উচ্চতর ফলন-বিদ্যা

উচ্চতর স্বন-বিদ্যা

[ADVANCED ACOUSTICS]

যুগলকিশোর মুখোপাধ্যায়, এম্.এস্‌সি., এম্.এ.,
স্কটিশ চার্চ মহাবিদ্যালয়, পদার্থবিদ্যা বিভাগ

(পশ্চিমবঙ্গ সরকারের একটি সংস্থা)

UCHCHATARA SWANA-VIDYA

by Jugal Kisor Mukhopadhyaya

প্রথম প্রকাশ : আগস্ট, ১৯৮০

প্রকাশক :
পশ্চিমবঙ্গ রাজ্য পুস্তক পর্ষদ,
আর্য ম্যানসন (নবম তল),
৬/এ, রাজা সুবোধ মল্লিক স্কোয়ার,
কলিকাতা-৭০০ ০১৩

মুদ্রক :
শ্রীত্রিদিবেশ বসু,
কে. পি. বসু প্রিন্টিং ওয়ার্কস,
১১, মহেন্দ্র গোস্বামী লেন,
কলিকাতা-৭০০ ০০৬

চিত্রাংকন : শ্রী এস্. মিত্র
শ্রীহেমকেশ ভট্টাচার্য

Published by Prof. Dibyendu Hota, Chief Executive Officer, West Bengal State Book Board under the Centrally Sponsored Scheme of production of books and literature in regional languages at the University level, launched by the Government of India in the Ministry of Education and Social Welfare (Department of Culture), New Delhi

প্রস্তাবনা

শিক্ষার প্রতি-স্তরেই মাতৃভাষায় শিক্ষা দেওয়া হবে—এই নীতি ভারত সরকার গ্রহণ করেছেন, এক-দশক কালেরও আগে। তারই ফলশ্রুতি হিসাবে আমাদের পশ্চিমবঙ্গ সরকার 'পশ্চিমবঙ্গ পুস্তক পর্ষদ' গঠন ক'রে বাংলা-ভাষায় সাম্মানিক পাঠ্যক্রম অনুসারে প্রামাণ্য পাঠ্যপুস্তক প্রণয়নের উদ্যোগ নিয়েছেন।

এই বইখানি সেই পাঠ্যক্রমের শব্দবিদ্যা-সম্পর্কিত রচনা। বইখানিকে প্রামাণ্য-স্তরের করতে গিয়ে অনেকক্ষেত্রেই বিশ্ববিদ্যালয়-নির্ধারিত পাঠ্যসীমা অতিক্রম করতে হয়েছে ; কারণ বর্তমানে স্বনশাস্ত্র পরিণতবিজ্ঞান, বিজ্ঞানের নানা শাখার ওপর নির্ভরশীল। আমাদের পাঠ্যক্রম ধ্রুপদী, অর্থাৎ তথ্যের বদলে তত্ত্বের ওপরেই ঝোঁক বেশী ; অথচ দ্বিতীয় বিশ্বযুদ্ধোত্তরকালে প্রায়োগিক শব্দশাস্ত্রের অভাবনীয় উন্নতি হয়েছে। বৈদ্যুতিক ও ইলেকট্রনীয় বর্তনীতত্ত্ব এবং তাদের মধ্যে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার স্পন্দনের সঙ্গে যান্ত্রিক স্পন্দন এবং উৎপন্ন শব্দতরঙ্গের ঘনিষ্ঠ উপমিতির উপলব্ধিই এই বিস্ময়কর অগ্রগতির প্রথম এবং সর্বাধিক সম্ভাবনাময় সোপান। যান্ত্রিক, শাব্দ এবং বৈদ্যুতিক উপমিতি সম্পর্কে প্রাথমিক আলোচনা (৮ অধ্যায়) তাই সঙ্গত ব'লে মনে হয়েছে ; মাইক্রোফোন, লাউড-স্পীকার ও অন্যান্য নানা যন্ত্রের ও সংস্থার কার্যনীতির আলোচনায় এই সাদৃশ্যের দিকে দৃষ্টি-আকর্ষণের যথাসম্ভব চেষ্টা করা হয়েছে।

যান্ত্রিক স্পন্দনে শব্দতরঙ্গের উৎপত্তি ; সরল-দোলন সরলতম স্পন্দন এবং সবরকম স্পন্দনের গোড়ার কথা। তাই তার সম্বন্ধে বিস্তারিত আলোচনা প্রথমেই করা হয়েছে। "The ideas of vibration and wave-motion lie at the root of everything else ; therefore they must be taught and taught thoroughly ; otherwise nothing will be understood properly." (*SCIENCE TEACHING* : F. W. WESTAWAY). তাই তরঙ্গগতি এবং নানারকম স্পন্দন বোঝাবার যথাসাধ্য চেষ্টা ও যত্ন করা হয়েছে—এখন "সিদ্ধি ভবানীর ইচ্ছাধীন"। স্বনতরঙ্গ স্থিতিস্থাপকশ্রেণীভুক্ত ; তাই বর্তমানে অত্যন্ত প্রাসঙ্গিকবোধে ভূকম্প, দ্রুতপ্রাসজ, সংকোচন এবং নমনজাত তরঙ্গমালার সংক্ষিপ্ত সংযোজন করা হয়েছে ; আরও যোগ করা হয়েছে বিপুল-বিস্তার,

স্বনোত্তর এবং গোলীয়-তরঙ্গ সম্বন্ধে যথেষ্ট আলোচনা, আলো আর শব্দের তরঙ্গধর্ম বিষয়ে গভীর নৈকট্য ও সাযুজ্য এবং শাব্দ-অনুভূতিতে মানবদেহ ও মস্তিষ্কের ভূমিকা সম্পর্কে আধুনিক তথ্যের সমাবেশ। ফলিত স্বনশাস্ত্রের বিস্ময়কর সব অবদান—মাইক্রোফোন, লাউড-স্পীকার, আধুনিক স্বনক গ্রাহক মুদ্রক বিশ্লেষক, রেডিওগ্রাম, টকি, টেপ-রেকর্ডার প্রভৃতি প্রায়োগিক যন্ত্রগুলির সঙ্গে বিস্তারিত পরিচয় ঘটাবার প্রয়াসও যথাসম্ভব করা হয়েছে। সর্বত্রই আধুনিক পরীক্ষণ ও দৃষ্টিভঙ্গীতে ছাত্রকে দীক্ষিত করার চেষ্টা করা হয়েছে, তবে কোথাও ধ্রুপদী তত্ত্ব বা গণিতীয় বিশ্লেষণকে উপেক্ষা বা সংক্ষিপ্ত ক'রে নয়। তাই পাঠ্যক্রমের তুলনায় বইখানি অনেক বড়ই হয়ে গেছে।

আয়ত্তাধীন ও অনায়ত্ত নানা কারণেই বইয়ের প্রকাশ অসঙ্গত-রকম বিলম্বিত ; মুদ্রণ-প্রমাদও রয়ে গেছে ('শুদ্ধিপত্র' দ্রষ্টব্য)। সংকেত-প্রকরণেও কিছু কিছু অসামঞ্জস্য আছে। লেখক সমস্ত দায়ভাগ নিয়ে পাঠক-কুলের কাছে ক্ষমাপ্রার্থী।

এবারে কৃতজ্ঞতা-স্বীকারের পালা। পূর্বাচার্যদের, যাঁদের রচনা থেকে সাহায্য নিয়েছি, তাঁদের সবার নাম 'পুস্তকপঞ্জী'তে সন্নিবিষ্ট ; অবশ্য পঞ্জীর বাইরেও সাহায্য গৃহীত হয়েছে। পুস্তক-পর্ষদের অধিকর্তারা এবং আরও সবাই অনেক ধৈর্য ও সহৃদয়তার সঙ্গে আমায় সহ্য করেছেন—তাঁদের ধন্যবাদ। কে. পি. বসু প্রিন্টিং ওয়ার্কসের কর্মিবৃন্দ সম্বন্ধেও একই কথা ; ছাপার ব্যাপারে আমার ভুল-ত্রুটি, অনভিজ্ঞতা তাঁরা মানিয়ে নিয়েছেন, সহযোগিতার উদার হাত সদা প্রসারিত রেখেছেন।

শেষে শ্রদ্ধাঞ্জলি—আমার পরমশ্রদ্ধেয় গুরু, অভিভাবক ও দিশারী, অধ্যাপক দেবীপ্রসাদ রায়চৌধুরী মহাশয়ের প্রতি। দীর্ঘ ত্রিশবছর আগে বাংলাভাষায় বিজ্ঞানচর্চায় দীক্ষা তিনিই আমায় দিয়েছিলেন। তাঁরই প্রসাদে ও ছত্রছায়ায় পরে গ্রন্থরচনার গৌরবও পেয়েছি। তাঁর রচিত ও 'চয়ন'-প্রকাশিত *Advanced Acoustics* এবং *Sound for Degree Students* বই দু'খানির ধ্যানধারণা, ভাষা ও ছবি গ্রন্থখানির সর্বত্রই অকৃপণভাবে ছড়িয়ে রয়েছে। তাঁর কাছে আমার ঋণ ঋষিঋণ—অপরিশোধনীয়।

কলকাতা
স্নানযাত্রা, ১৩৮৭ গ্রন্থকার
২৮. ৬. ১৯৮০

সূচীপত্র

বিষয় পৃষ্ঠা

পুস্তকপঞ্জী

BAGENAL AND WOOD, *Planning for Good Acoustics*, Methuen
BARTON, *Text-Book of Sound*, Macmillan
BERANEK, *Acoustics*, McGraw Hill ;
Acoustic Measurements, Wiley
BERGMANN, *Ultrasonics*, Bell
CHESNEY, *Vibrating Systems*, Cambridge
COULSON, *Waves*, Oliver and Boyd
CRANDALL, *Vibrating Systems and Sounds*, Van Nostrand
CULLUM, *Practical Applications of Acoustic Principles*, Spon
DAVIES, *Modern Acoustics*, Bell
FLETCHER, *Speech and Hearing*, Van Nostrand
HELMHOLTZ, *Sensations of Tone*, Longmans (Dover)
HUETER AND BOLT, *Sonics*, Wiley
KAR, *Theoretical Physics* (Vol. II), Dasgupta
KINSLEY AND FREY, *Fundamentals of Acoustics*, Wiley
LAMB, *Dynamical Theory of Sound*, Arnold
MILLER, *Sound Waves, Their Shape and Speed*, Macmillan
MORSE, *Vibrations and Sound*, McGraw Hill (Kogakusha)
MOIR, *High Quality Sound Reproduction*, Chapman and Hall
OLSON AND MASSA, *Applied Acoustics*, Blakiston
RANDAL, *Introduction to Acoustics*, Addison Wesley
RAYCHAUDHURY, *Advanced Acoustics*, Chayan
RICHARSON, *Sound*, Arnold
SWENSON, *Principles of Modern Acoustics*, Van Nostrand
VIGOREUX, *Ultrasonics*, Chapman and Hall
WOOD, A. B., *Text-Book of Sound*, Bell
WOOD, ALEX, *Acoustics*, Blackie
WOOD, R. W., *Supersonics*, Brown University

১

সরল দোলন

Simple Harmonic Motion

১-১. অবতরণিকা :

আজকের দিনে স্বন- তথা শব্দ-বিদ্যা খুবই আকর্ষণীয় এবং কৌতূহলোদ্দীপক পঠনপাঠন ও আলোচনার বিষয়বস্তু। নিজ নিজ ক্ষেত্রে মৌলিক সমস্যা সমাধানের উদ্দেশ্যে এর দুয়োরে ভিড় জমাচ্ছে গীততত্ত্ব, ভাষাতত্ত্ব, যন্ত্রবিদ্যা, মনোবিদ্যা, সৌধবিদ্যা, নাট্যশাস্ত্র, চিকিৎসাশাস্ত্র প্রভৃতি বিচিত্র এবং আপাত-নিঃসম্পর্ক ফলিত বিজ্ঞানের নানা শাখা। তার গবেষণাগারে যেসব সমস্যা নিয়ে কাজ চলছে, তার মধ্যে রয়েছে বক্তৃতাকক্ষ এবং চলচ্চিত্র-স্টুডিওর উন্নততর পরিকল্পনা, মাইক্রোফোন, লাউডস্পীকার, টেলিফোন প্রভৃতি সর্বদা ব্যবহার্য শব্দের গ্রাহক ও পুনরুৎপাদকের ক্রমোন্নতি, কৃত্রিম বাক্‌সৃষ্টি, জটিল শব্দমালার বিশ্লেষণ এবং অনুভূতিগ্রাহ্যতা, মানুষের মনে এবং দেহে স্বনোত্তর গতিবেগের প্রতিক্রিয়া, স্বনোত্তর তরঙ্গের সহায়তায় পানীয়ে জীবাণুনাশ, মস্তিষ্কে দুষ্টব্রণ অর্থাৎ টিউমারের সন্ধান, কোলাহলপীড়িত মহানগরীতে যান্ত্রিক অপসুর বা গোলমাল নিরসনের ব্যবস্থা, ইত্যাদি।

শব্দ বলতে উদ্দীপক (stimulus) ও অনুভূতি (sensation)—অর্থাৎ কারণ এবং ফল দুই-ই বোঝায়। আমরা যে কথা বলি বা শুনি—তারা অনুভূতিসাপেক্ষ ; এই জাতের শব্দ কিছুটা শারীরতত্ত্ব, কিছুটা আবার মনোবিদ্যানির্ভর—এদের আলোচনা ১৭ অধ্যায়ে সংক্ষেপে করা হবে। বিস্তারিত আলোচনার বিষয়বস্তু হবে অনুভূতিনিরপেক্ষ অর্থাৎ ভৌত শব্দ। সেই আলোচনার অঙ্গীভূত হবে শব্দের উৎপত্তি, ব্যাপ্তি, সন্ধান, প্রতিবেদন (response) প্রভৃতি ব্যাপার। যথাযথ বিস্তার ও কম্পাংকপাল্লার মধ্যে কোন স্পন্দক কাঁপতে থাকলে বায়ুতে শ্রুতিগ্রাহ্য (sonic) অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ উৎপন্ন হয় ; সেই তরঙ্গ কাণের পর্দায় এসে পড়লে, পর্দা কাঁপে এবং আমরা শব্দ শুনি। কাজেই দেখা যাচ্ছে যে, শব্দশক্তি, তাপ বা বিদ্যুতের মতো শক্তির কোন নিরপেক্ষ রূপ নয়—সীমিত পাল্লায় স্পন্দনশীল স্বনকের যান্ত্রিক শক্তি মাত্র। অতএব স্পন্দন ও তরঙ্গগতির সৃতিবিদ্যাই শব্দশাস্ত্র আলোচনার

ভিত্তি। অবশ্য শ্রুতিগ্রাহ্য কম্পাংকপাল্লার ওপরে বা নিচে স্বনোত্তর এবং অবস্বন তরঙ্গ আমাদের কাণে সাড়া জাগায় না বটে, কিন্তু ভৌত প্রকৃতিতে তারা স্বনতরঙ্গ থেকে অভিন্ন।

আবার, যান্ত্রিক স্পন্দনের সঙ্গে প্রত্যাবর্তী (alternating) বিদ্যুৎধারার মিল অনেক ; তাই যান্ত্রিক, শাব্দ ও বৈদ্যুতিক সগোত্রীয় রাশিগুলির তুলনামূলক আলোচনা (৮ অধ্যায়) স্বনবিদ্যার চর্চা এবং বোঝার পথ সুগম করেছে। তড়িৎ ও ইলেকট্রনীয় যন্ত্রবিদ্যার সঙ্গে শব্দবিদ্যা এখন ওতপ্রোতভাবে জড়িয়ে গেছে। জোরালো এবং অভিসারী আলো ছাড়া স্পন্দন-নিরীক্ষণ সম্ভব নয়। চুম্বক ছাড়া মাইক্রোফোন, লাউডস্পীকার, টেলিফোন, টেপ-রেকর্ডার অচল। ফিল্মে শব্দ রেকর্ড করতে আলো, বিদ্যুৎ, চুম্বক অপরিহার্য। স্বনোত্তর তরঙ্গ সৃষ্টি করতে স্ফটিকে বৈদ্যুতিক-তাঁত এবং প্রচুম্বকে চৌম্বক-তাঁত (striction) ধর্ম কাজে লাগানো হয় ; শব্দোত্তর বেগে এবং অতি তীক্ষ্ণ বা প্রচণ্ড শব্দপ্রাবল্যে মানব ও জীবের দেহমনে প্রতিক্রিয়া অথবা শব্দের অনুভূতি বা কৃত্রিম বাক্‌সৃষ্টির ব্যাপারে শারীর- এবং মনোবিদ্যার ওপর স্বনবিদ্যা বিশেষভাবে নির্ভরশীল। এইরকম বহুমুখী নির্ভরতা স্বনশাস্ত্রকে পরিণত (adult) বিজ্ঞানের মর্যাদা দিয়েছে।

স্বনবিজ্ঞানে মূল আলোচ্য বিষয়, স্থিতিস্থাপক স্পন্দন ও তরঙ্গ ; বর্তমানে এর এলাকা আর কর্ণগ্রাহ্য কম্পাংক বা তীব্রতায় সীমিত নেই—ওপরের এবং নিচের দুই দিকেই সীমা ছাড়িয়ে গেছে। আজকাল শব্দতরঙ্গগুলিকে দুই শ্রেণীতে ভাগ করা হয়—(ক) স্বনতরঙ্গ, যেক্ষেত্রে মাধ্যমে পীড়ন অল্প, বিকৃতি হুকের সূত্রশাসিত আর (খ) প্রবল স্বনোত্তর তরঙ্গ, যেখানে পীড়ন, স্থিতিস্থাপক সীমার উর্ধ্বে, অর্থাৎ হুকের সূত্র অচল ; প্রসঙ্গক্রমে বলা যায়, এদের সহায়তায় ভিন্ন ভিন্ন অবস্থায় পদার্থের আচরণের ব্যাপক সন্ধানের নিত্য নতুন দিগন্ত খুলে যাচ্ছে। তবে আমাদের আলোচনা প্রথমোক্ত শ্রেণী নিয়েই।

১-২. পর্যাবৃত্ত গতি এবং স্পন্দন :

গতি মোটামুটিভাবে দুই শ্রেণীর—রৈখিক আর পর্যাবৃত্ত। কোন কণা যদি একই পথে যাতায়াত করে আর নির্দিষ্ট কালান্তরে পথের একই বিন্দুতে ফিরে ফিরে আসে তবে সেই গতিকে পর্যাবৃত্ত গতি বলে। কণার পথ সরল বা বক্র রেখাংশ কিম্বা বদ্ধপথ (যেমন বৃত্ত বা উপবৃত্ত) ধরে হতে পারে।

কণার গতিতেই আমরা আলোচনা সীমিত রাখব। তবে দৃঢ় বস্তুমাত্রেই অসংখ্য কণার অপরিবর্তনেয় সমাবেশ; সুতরাং কণার গতি সম্পর্কে সব সিদ্ধান্তই তাদের বেলাতেও প্রযোজ্য। পর্যাবৃত্ত গতির অসংখ্য উদাহরণ আমাদের আশেপাশে—পৃথিবীর আহ্নিক গতি, সূর্যকে ঘিরে গ্রহমাত্রেরই বার্ষিক আবর্তন, রিলে রেসে প্রতিযোগীদের দৌড়, জীবমাত্রেরই হৃদ্স্পন্দন, পাখা বা যন্ত্রপাতির ঘূর্ণন, সুরশলাকা বা সটান তারের স্পন্দন, ভারাক্রান্ত স্প্রিং-এর প্রান্তে ওজনের নর্তন, মোচ্ড়ানো দড়ির ব্যবর্তন—এর সামান্য ক'টি উদাহরণ।

এদের মধ্যে শেষের তিনটি বিশুদ্ধ স্পন্দন। কোন মধ্যক বা সাম্য অবস্থানের সাপেক্ষে কোন কণা বা দৃঢ় বস্তু যদি একই পথে সমান কালান্তরে আনাগোনা করে, তাহলে সেই গতিকে **কম্পন** বা **স্পন্দন** বলে। স্পষ্টতই স্পন্দন, পর্যাবৃত্ত গতির একটি বিশেষ শ্রেণী। স্পন্দনপথ যদি সরলরেখাংশ হয় স্পন্দন তাহলে রৈখিক। আমরা অবশ্য এদের আলোচনাই বিস্তারিত-ভাবে ক'রব। তবে দীর্ঘ ব্যাসের ক্ষুদ্রচাপ বরাবর এবং কৌণিক স্পন্দনের সংক্ষিপ্ত আলোচনাও করা হবে।

কোন কণাকে যদি কোন বল (ক) তার গতির বিপরীত দিকে (খ) কোন এক স্থির বিন্দু অভিমুখে (গ) সর্বদাই ঠেলে, তবে তার স্পন্দন হয়; সরল দোলকের বা নর্তনশীল স্প্রিং-এর কথা ভাব। ঐ বলকে প্রত্যানয়ক বল আর ঐ স্থির বিন্দুকে মধ্যক বা সাম্য অবস্থান বলে। এই বলই সাম্য অবস্থান থেকে বিচ্যুত কণাকে সেই বিন্দুতে টেনে আনতে চায়। স্পন্দনকালে যে কোন মুহূর্তে নিমেষ-সরণ সময়-নির্ভর অর্থাৎ $\mathbf{r}=f(t)$ আর প্রত্যানয়ক বল (P) নিমেষ-সরণের অপেক্ষক বা ফলন; অর্থাৎ $\mathbf{P}=f(r).\,\mathbf{r}_1$ [এখানে $\mathbf{r}_1$ সরণমুখী ঐকিক ভেক্টর বা সদিশ্ রাশি]। লক্ষ্য কর যে, প্রত্যানয়ক বল প্রকৃতিতে কেন্দ্রগ (central) কাজেই সংরক্ষী।*

প্রত্যানয়ক বলের মান (P) সরণ-নির্ভর; তাই এই বল আর সরণের মধ্যে সম্পর্ক সাধারণ রাশিক্রমের (series) আকারে লেখা যায়, অর্থাৎ

$$P=f(r)=-[a_0+a_1r+a_2r^2+a_3r^3+\cdots] \qquad (১\text{-}২.১)$$

গোড়ার বিয়োগ চিহ্ন নির্দেশ করছে যে বল আর সরণ বিপরীতমুখী। এখানে a_0, a_1, a_2 প্রভৃতি সহগগুলি ক্রমিক দ্রুতক্ষয়িষ্ণু স্থিররাশি। প্রত্যানয়ক

* মহাকর্ষীয়, চৌম্বক এবং বৈদ্যুতিক আকর্ষণী-বলগুলিও কেন্দ্রগ এবং সংরক্ষী; তাদের বেলায়

$$\mathbf{P}=\mathbf{r}_1 f(r)=\mathbf{r}_1\frac{-k}{r^2}$$

বলের বেলায় $a_0=0$, নাহলে সাম্য অবস্থানে $(r=0)$ এই বলের এক নির্দিষ্ট মান (a_0) থাকবে, যেটা হতে পারে না। আবার r যদি স্বল্পমান হয়, তবে a_2r^2, a_3r^3,···প্রভৃতি নগণ্য হয়ে যাবে কারণ স্বল্পমান রাশির ঊর্ধ্বঘাতগুলি একেই খুব ছোট, তার ওপরে আবার তাদের সহগগুলিও ক্ষুদ্র। তখন, অর্থাৎ **স্বল্প সরণে, প্রত্যানয়ক বল সরণের সমানুপাতিক**; তখন a_1r রাশিটি r-এর একঘাত বা একমাত্রা বা রৈখিক ফলন বা অপেক্ষক অর্থাৎ

$$P=-a_1r \qquad (১\text{-}২.২)$$

বল ও সরণ বিপরীতমুখী হওয়ায় প্রত্যানয়ক বলের ক্ষেত্রে, সরণের সহগ (a_1) ঋণাত্মক। এই জাতীয় গতিকে সরল দোলন বা সরল সমঞ্জস (harmonic) গতি বলে।

১-৩. সরল দোলন (S.H.M.):

রৈখিক প্রত্যানয়ক বলের ক্রিয়ায় কণা বা বস্তুর গতিকে সরল দোলন বলে। এই সংজ্ঞা থেকে সরল দোলনের গতিপ্রকৃতি, উৎপত্তি এবং স্পন্দনবৈশিষ্ট্যগুলি খুব সহজেই মেলে। রৈখিক সরল দোলনের উৎপত্তি ঘটায় প্রত্যানয়ক বল, গতির প্রকৃতি হয় পর্যাবৃত্ত এবং স্পন্দনের বৈশিষ্ট্য থাকে তিনটি—

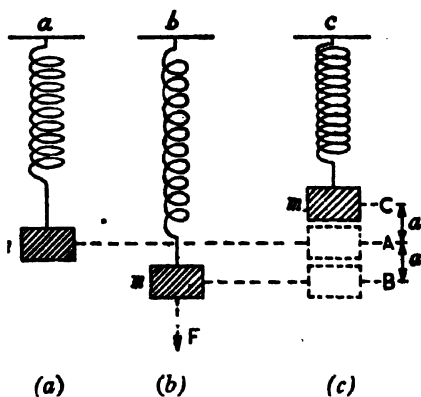
(ক) সরণপথ সরল বা বক্র রেখার ক্ষুদ্রাংশ। এই পথেই স্পন্দনশীল কণা আনাগোনা করে এবং সমান কালান্তরে একই বিন্দুতে পৌঁছয়।

(খ) প্রত্যানয়ক বলের ক্রিয়ায় এই গতির উৎপত্তি। এই বল প্রকৃতিতে কেন্দ্রগ, সদাই স্পন্দকের সাম্য বা অবিচলিত অবস্থানমুখী।

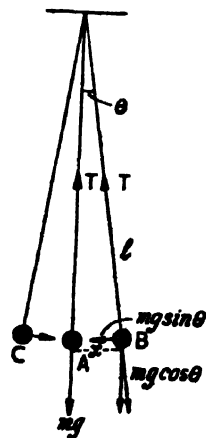
(গ) যেকোন নিমেষে এই বলের মান, সাম্য অবস্থান থেকে কণার সরণের সমানুপাতিক।

সরল দোলনের এই সংজ্ঞা ভৌত বা গতিবিদ্যাসম্মত। ১-৫ অনুচ্ছেদে আমরা এর এক বিকল্প সংজ্ঞা আলোচনা ক'রব।

উদাহরণ: (১) ভারাক্রান্ত স্প্রিং—1.1(a) চিত্রে একটি স্প্রিং দেখানো হয়েছে; তার ওপরের প্রান্ত দৃঢ়ভাবে আটকানো, তলার প্রান্তে একটি ভর (m) বাঁধা। তার ভারে স্প্রিং লম্বা হয়; এই বিকৃতির ফলে উৎপন্ন পীড়ন বল ঊর্ধ্বাভিমুখী এবং ভরের ওজনকে প্রশমিত রাখে। এখন ভরটিকে টেনে নামালে [1.1(b) চিত্র] স্প্রিংটি লম্বায় আরও বাড়ে; তাতে ঊর্ধ্বমুখী পীড়ন বল আরও বাড়ে এবং হুকের সূত্রানুসারে এই প্রত্যানয়ক বল, স্প্রিং-এর বিকৃতি অর্থাৎ দৈর্ঘ্যবৃদ্ধির সমানুপাতিক।

এখন ভরটিকে ছেড়ে দিলে সে ওপরে উঠে যাবে এবং সাম্য অবস্থান পার হয়ে c বিন্দুতে পৌঁছে স্প্রিং-এর দৈর্ঘ্য হ্রাস [1-1(c) চিত্র] ঘটাবে। সেটাও বিকৃতি, কিন্তু এবারে পীড়নবল নিম্নমুখী হয়ে ভারটিকে নিচে নামাবে। এখানে ভরটির গতি খাড়া ওপর-নিচে C থেকে B পর্যন্ত ঘটছে, প্রত্যানয়ক :

চিত্র 1.1—ভারাক্রান্ত স্প্রিং

বল ভরটির অবিচলিত অবস্থান (A)-মুখী এবং হুকের সূত্রবশে সরণের সমানুপাতিক। কাজেই ভরটির গতি সরল দোলজাতীয় এবং রৈখিক।

(২) **সরল দোলক**—হাল্কা নরম সুতো দিয়ে ছোট ভারী একটি ধাতুর গোলক দৃঢ় অবলম্বন থেকে ঝুলিয়ে দিয়ে (1.2 চিত্র) পরীক্ষাগারে সরল দোলক তৈরি হয়। সাম্য অবস্থানে (A) বলের ওজন mg আর সুতোর টান T পরস্পরকে প্রশমিত করে। বিচলিত অবস্থানে (B) দুই বল T এবং mg এক সরলরেখা বরাবর সক্রিয় নয়, সুতরাং সাম্যে চ্যুতি ঘটেছে। এখানে ওজনের উপাংশ $mg \sin \theta$ দোলককে A-র দিকে ঠেলছে ; আবার দোলক যখন C-তে, তখন এই বলই A-অভিমুখী। এই বলের ক্রিয়ায় দোলক দীর্ঘ ব্যাসার্ধের (l) ক্ষুদ্র চাপ BAC বরাবর আনাগোনা করে। সরণবিমুখী $mg \sin \theta$ বলের ক্রিয়াতেই B ও C বিন্দুতে দোলক ক্ষণিকের জন্য থেমে যায়। BAC চাপ মাপে ছোট বলেই θ

চিত্র 1.2—সরল দোলক

কোণও ছোট ; সুতরাং $\sin\theta \simeq \theta \simeq x/l$ ধরা যায়। অতএব প্রত্যানয়ক বল

$$P = -mg \sin\theta \simeq -mg\,\theta = -mgx/l = -sx$$

$$[\,s = mg/l = \text{ধ্রুবক}\,] \qquad (১\text{-}২.৩)$$

দেখা যাচ্ছে সরণের সমানুপাতিক। কাজেই সরল দোলকের গতি সরল দোল-জাতীয়।

সরল দোলনের বিকল্প সংজ্ঞা—কোন ব্যাসের ওপর সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপ সরল দোলন—এই সংজ্ঞাকে জ্যামিতিক বা সৃতিবিজ্ঞান (dynamical) সম্মত বলা চলে। এই দৃষ্টিভঙ্গীতে দেখলে সরল দোলনের গতিপ্রকৃতি সম্বন্ধে সহজে ধারণা হয় বটে, কিন্তু উৎপত্তির কারণ বোঝা যায় না। ১-৫ পরিচ্ছেদে এ সম্বন্ধে বিস্তারিত আলোচনা হবে। তার পরেই দেখব যে সংজ্ঞা-দুটি পরস্পর বিনিমেয়—একটি থেকে অপরটি মেলে।

সরল দোলনের চর্চার গুরুত্ব—(১) সাধারণত অধিকাংশ গতিই পর্যাবৃত্ত ; সরল দোলন তাদের মধ্যে সরলতম আর ফুরিয়ার উপপাদ্য (১০-১১ অনুচ্ছেদ) বলে, যেকোন পর্যাবৃত্ত গতি তথা জটিল স্পন্দনই, কমবেশী কিন্তু নির্দিষ্ট সংখ্যক সরল দোলনের সমষ্টিমাত্র। এই সমষ্টি অবশ্যই সদিশ্ (vector) সমষ্টি।

(২) স্পন্দনক্ষম তন্ত্রমাত্রই (system) স্বল্পবিস্তারে দুললে তার স্পন্দন সরল দোলন হবে।

(৩) এক তন্ত্র থেকে তন্ত্রান্তরে চালান (transfer) করলে সব গতিরই অল্পবিস্তর রূপান্তর হয়, হয় না মাত্র সরল দোলনের ক্ষেত্রেই।

(৪) ওহ্‌মের সূত্রানুযায়ী [১৭-৬(ক) পরিচ্ছেদ] আমাদের কাণ কেবলমাত্র সরল দোল-জাতীয় স্পন্দনেই সাড়া দিতে পারে ; অর্থাৎ, সে জটিল শব্দের ফুরিয়ার বিশ্লেষণ ক'রে নেয়।

(৫) তরঙ্গচর্চা সরল দোল-জাতীয় তরঙ্গ থেকে সুরু করা হয়। সব তরঙ্গের আলোচনাতেই সরল দোলনের দরকার ; কেননা মাধ্যমে, এমন কি বিনা মাধ্যমেও এই স্পন্দনই সরল দোল-জাতীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করতে পারে। ৫ অধ্যায়ে আমরা এ বিষয়ে আলোচনা ক'রব।

১-৪. সরল দোলনের অবকল সমীকরণ :

একমাত্র প্রত্যানয়ক বলের ক্রিয়াতেই সরল দোলন হয়। সরণ x-অক্ষ বরাবর হলেই ১-২.২ সমীকরণে প্রত্যানয়ক বলের $(a_1 r)$ মান sx ধরা যায়। গতিশীল যেকোন কণার ওপরে যেকোন নিমেষে বা অবস্থানেই জড়তা (inertial) বল ($=$ ভর $\times$ ত্বরণ)—গতিমুখে ক্রিয়া করে। তাহলে স্পন্দকের যেকোন অবস্থানেই প্রত্যানয়ক বল এবং জড়তা বল সমান ও বিপরীতমুখী। সুতরাং

$mf = -sx$ বা $f + (s/m)x = 0$ অর্থাৎ $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$* (১-৪.১)

এই সমীকরণে s হচ্ছে একক সরণে প্রত্যানয়ক বল এবং $\omega^2 = s/m$—একক সরণে প্রত্যানয়ক ত্বরণ।

আমরা 1.1 চিত্রে দেখেছি যে, স্প্রিংকে বিকৃত করলে তার মধ্যে সমানুপাতিক পীড়ন বলের উদ্ভব হয় আর সেই বলই প্রত্যানয়ক বলের কাজ করে। স্প্রিংকে যতই টানা যায় বা চাপা যায় ততই তার প্রতিরোধ বা দার্ঢ্য (stiffness) বাড়ে। প্রযুক্ত বল এবং বিকৃতির অনুপাতকে স্প্রিং- বা দার্ঢ্য-গুণক (stiffness factor) বলে। এই গুণকটিই একক সরণে সক্রিয় প্রত্যানয়ক (s) বল।

সমাধান—১-৪.১ সমীকরণের সমাধান করতে দুবার সমাকলন দরকার; কাজেই সমাধানে দুটি সমাকলন ধ্রুবক থাকবে। সরাসরি এই সমীকরণের সমাকলন সম্ভব নয়। তাই সমাকলন করতে হলে সমাকলন উৎপাদক (integrating factor) দিয়ে গুণ করাই বিধি। এখানে সমাকলন ধ্রুবক $2(dx/dt)$ লাগবে। তখন ১-৪.১ সমীকরণ হয়ে দাঁড়াবে

$$2\frac{dx}{dt}\cdot\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 . 2x\frac{dx}{dt}$$

বা $$2v\cdot\frac{dv}{dt} = -\omega^2 . 2x\frac{dx}{dt}$$

বা $$\frac{d}{dt}(v^2) = -\omega^2 . \frac{d}{dt}(x^2)$$

সমাকলন করলে পাই, $v^2 = -\omega^2 x^2 + c.$ (১-৪.২)

---

* dx/dt রাশিটিকে $\dot{x}$ এবং d^2x/dt^2-কে $\ddot{x}$ প্রতীক দিয়ে চিহ্নিত করা হয়। বস্তুত যেকোন রাশির মাথায় ডট্ বসালে সময় (t) সাপেক্ষে তার অবকলন গুণাংক (differential coefficient) বোঝায়।

সমাকলন ধ্রুবক c-র মান বার করতে হলে প্রাথমিক বা **আগু সর্ত** আরোপ করতে হবে। সরল দোলক বা স্প্রিং-এর কথা মনে করলে আমরা দেখি যে, চূড়ান্ত সরণে ($x=a=$ সরণবিস্তার) কণার দোলন নিমেষের জন্যে থেমে যায় অর্থাৎ $v=0$ হয়। এই আদ্য সর্ত ১-৪.২-এ বসালে পাব

$$-\omega^2a^2+c=0 \quad \text{বা} \quad c=\omega^2a^2$$

ঐ সমীকরণে c-র এই মান বসালেই মিলছে

$$v^2=\omega^2(a^2-x^2) \quad \text{অর্থাৎ} \quad v=dx/dt=\pm\,\omega a\sqrt{1-x^2/a^2}$$

অর্থাৎ $$\frac{dx}{a\sqrt{1-x^2/a^2}}=\pm\,\omega.dt$$

সমাকলন দ্বিতীয়বার করলে যথাক্রমে $+ve$ এবং $-ve$ চিহ্ন ধ'রে পাব

$$\sin^{-1}\frac{x}{a}=\omega t+\phi \quad \text{এবং} \quad \cos^{-1}\frac{x}{a}=\omega t+\phi$$

অতএব $x=a\sin(\omega t+\phi)$ (১-৪.৩ক)

বা $x=a\cos(\omega t+\phi)$ (১-৪.৩খ)

সমাকলন ধ্রুবক a এবং ϕ—১-৪.১ সমীকরণকে দুবার সমাকলনে দুটি সমাকলন ধ্রুবক যথাক্রমে a এবং ϕ এসেছে। সমাধানলব্ধ দুই সমীকরণেই (১-৪.৩) নিমেষ-সরণ x-এর চূড়ান্ত মান a, কারণ সাইন বা কোসাইনের চূড়ান্ত মান 1 হয়; সুতরাং a হচ্ছে চূড়ান্ত সরণ তথা **সরণবিস্তার**। আবার $(\omega t+\phi)$ রাশিটি, সময় t-র সঙ্গে বদলায় ব'লে তাকে **সরণদশা** বলতে পারি; $t=0$ মুহূর্তে অর্থাৎ সময় মাপার সুরুতে $\omega t=0$, তাই $x=a\cos\phi$ বা $a\sin\phi$ হবে। সুতরাং ϕ স্পন্দনের **আদিদশা**। ১-৯ অনুচ্ছেদে স্পন্দনদশা নিয়ে বিস্তারিত আলোচনা হবে।

সরণ সমীকরণের বিকল্প রূপ—১-৪.৩ সমীকরণ-দুটিকে কিছুটা অদলবদল ক'রে সরণকে দুটি সাইন ও কোসাইন রাশির যোগফল হিসেবে প্রকাশ করা যায়। যেমন

$$x=a\sin(\omega t+\phi)=a\sin\omega t\cos\phi+a\cos\omega t\sin\phi$$

$$=C\sin\omega t+D\cos\omega t \qquad \text{(১-৪.৩গ)}$$

অথবা $x = a\cos(\omega t + \phi) = C\cos\omega t + D\sin\omega t$
(১-৪.৩ঘ)

দুটি ক্ষেত্রেই $C(= a\cos\phi)$ এবং $D(= \pm a\sin\phi)$ রাশি-দুটিকে সমাকলন ধ্রুবক বলা চলে।

C ও D-র স্বরূপ নির্ণয়—স্পন্দনসাপেক্ষে C এবং D-র ভৌত পরিচয় পেতে হলে দুটি সমীকরণ চাই ; আর তা করতে হলে সমীকরণ-দুটিতে আদ্য সর্ত আরোপ করতে হবে। স্পন্দন যেভাবে সুরু করা হবে তাই-ই আদ্য সর্ত ; সেই স্পন্দন সুরু করা যায়

(ক) **প্রাথমিক সরণ** দিয়ে অর্থাৎ স্পন্দককে তার স্থির অবস্থান থেকে সরিয়ে, তারপর ছেড়ে দিয়ে ; বা

(খ) **প্রাথমিক বেগ** সঞ্চার ক'রে, অর্থাৎ স্পন্দককে স্থির অবস্থান থেকে ধাক্কা দিয়ে সরিয়ে।

নির্দিষ্ট আদি সরণ $(x = x_0)$ ঘটিয়ে স্পন্দন সুরু করা হলে অর্থাৎ $t = 0$ নিমেষে $x = x_0$ হলে, ১-৪.৩(গ) সমীকরণ থেকে পাব

$$x_0 = C \qquad (১\text{-}৪.৪ক)$$

ধাক্কা দিয়ে স্পন্দন সুরু করলে $t = 0$ নিমেষে আদিবেগ $(v_0 = \dot{x}_0)$ নিয়ে তা নড়তে আরম্ভ করে ; এখন ১-৪.৩ঘ সমীকরণ থেকে পাই

$$\dot{x} = -\omega C\sin\omega t + \omega D\cos\omega t$$

তাহলে $(\dot{x})_{t=0} = \omega D$ অর্থাৎ $D = \dot{x}_0/\omega$ (১-৪.৪খ)

অতএব সমাকলন ধ্রুবক C হচ্ছে স্পন্দনবিস্তার আর D হচ্ছে আদি বেগ $(\dot{x}_0)$ এবং একক সরণে প্রত্যানয়ক ত্বরণের বর্গমূলের (ω) অনুপাত। এই মান সম্বলিত সমীকরণে যেকোন নিমেষ-সরণ হবে তাহলে

$$x = x_0\cos\omega t + (\dot{x}_c/\omega)\sin\omega t \qquad (১\text{-}৪.৫)$$

উদাহরণ—সরল দোলনরত কোন কণার আদি সরণ এবং আদি বেগ x_0 এবং v_0, তার গতীয় সমীকরণ $x = a\cos(\omega t - \alpha)$ হলে, x_0 এবং v_0-র পরিপ্রেক্ষিতে a অবং α-র মান নির্ণয় কর। $x = a\sin(\omega t - \alpha)$ হলেই বা তাদের মান কত কত ?

সমাধান—(ক) আদি মুহূর্তে অর্থাৎ $t = 0$ হলে,

$$x_0 = a\cos(-\alpha) = a\cos\alpha$$

আবার যেকোন মুহূর্তে বেগ $v = \dot{x} = -\omega a \sin(\omega t - \alpha)$

তাহলে আদি মুহূর্তে বেগ $v_0 = \dot{x}_0 = -\omega a \sin(-\alpha)$

$$= \omega a \sin \alpha$$

$\therefore \quad v_0/x_0 = \omega \tan \alpha$ অর্থাৎ $\alpha = \tan^{-1} v_0/\omega x_0$

আবার $a^2 \sin^2\alpha = v_0{}^2/\omega^2$ এবং $a^2 \cos^2\alpha = x_0{}^2$

$\therefore \quad a = \sqrt{(v_0{}^2/\omega^2) + x^2} = \sqrt{(v_0{}^2 + x_0{}^2\omega^2)}/\omega$

(খ) এখানে $x_0 = a \sin \alpha$ এবং $v_0 = \omega a \cos \alpha$

$\therefore \quad \tan \alpha = \omega x_0/v_0$ বা $a = \tan^{-1} \omega x_0/v_0$

আবার $a^2 \sin^2\alpha = x_0{}^2$ এবং $a^2 \cos^2\alpha = v_0{}^2/\omega^2$

$\therefore \quad a^2 = x_0{}^2 + v_0{}^2/\omega^2$ বা $a = \sqrt{(\omega^2 x_0{}^2 + v_0{}^2)}/\omega$

প্রশ্ন—x-অক্ষ বরাবর সরণরত কণা, প্রত্যানয়ক বল (kx) এবং Ft/T মানের দুই বলের নিয়ন্ত্রণাধীনে চললে তার গতীয় সমীকরণ কি হবে ?

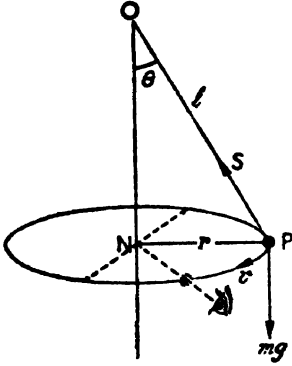
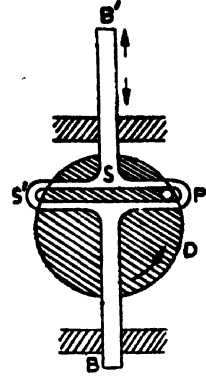
[উঃ $x = Ft/kT + A \cos(\sqrt{k/m}.t - \phi)$]

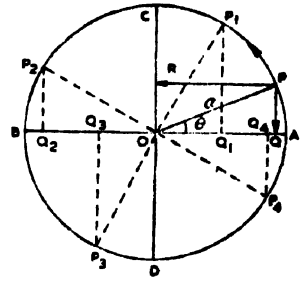
১-৫. সরল দোলন ও সুষম চক্রগতি :

সরল দোলনের বিকল্প সংজ্ঞায় বলা হয়েছে যে, **কোন ব্যাসের ওপর সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপই সরল দোলন**। সরল দোলন এবং সুষম চক্রগতি দুইই নিয়মিত পর্যাবৃত্ত গতি ; দ্বিতীয়টিতে বলের মান স্থির, দিক্ সদাই বদলাচ্ছে আর প্রথমটিতে মান সদাই বদলাচ্ছে, দিক্ থাকছে মাত্র দুটি। ১০-৭ অনুচ্ছেদে আমরা দেখব যে অভিন্ন দুটি সরল দোলন পরস্পর সমকোণে হতে থাকলে তাদের উপরিপাতনে সরল দোলন ঘটে।

পরীক্ষণ—(১) সরল দোলকের পিণ্ডটি যদি বৃত্তপথে ঘোরে তাকে **শংকু দোলক** [1-3(a) চিত্র] বলে। দোলনতলে চোখ রেখে লক্ষ্য করলে মনে হবে, দোলকপিণ্ডটি যেন দৃষ্টিরেখার সমকোণে ব্যাস বরাবর যাতায়াত করছে—অর্থাৎ দোলকপিণ্ডের আপাতগতি, কোন ব্যাসের ওপর চক্রগতির অভিক্ষেপ।

(২) 1-3(b) চিত্রে একটি সচল দণ্ডের (BB') দীর্ঘ রন্ধ্র (PSS') একটি ঘূর্ণমান চাকার (D) পরিধিতে বসানো পিন (P) দিয়ে চাকার সঙ্গে যুক্ত।

চাকাটি ঘুরতে থাকলে পিনটি ঘুরবে এবং দণ্ডটি এগোবে পেছোবে। তখন রন্ধ্রের PS অংশ ব্যাসের ওপর পরিধিবিন্দুর অভিক্ষেপের ভূমিকা নেবে।

চিত্র 1.3(*a*)—শঙ্কু দোলক

চিত্র 1.3(*b*)—চক্রগতির অভিক্ষেপ

তাত্ত্বিক প্রমাণ—সরল দোলন যে সুষম চক্রগতির ব্যাস বরাবর অভিক্ষেপ, তা 1.4 চিত্রের সাহায্যে প্রমাণ করা যায়। ধরা যাক, m ভরের কোন কণা $APP_1CP_2BP_3DP_4A$ বৃত্তপথে সুষম কৌণিক বেগে (ω) ঘুরছে। তার চলার পথে ভিন্ন ভিন্ন নিমেষে $P, P_1, C, P_2, P_3, D, P_4$ অবস্থানগুলি থেকে AB ব্যাসের ওপর লম্ব ফেলা হয়েছে; $Q, Q_1, O, Q_2, Q_3, Q\ Q_4$ তাদের পাদবিন্দু বা অভিক্ষেপ।

চিত্র 1.4—চক্রগতির অভিক্ষেপ এবং সরল দোলন

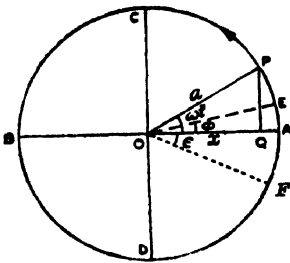
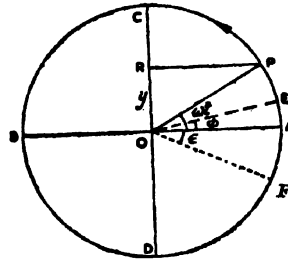
এখন P বিন্দু ক্রমাগত বৃত্ত-পরিক্রমা করতে থাকলে Q বিন্দু AB বরাবর যাতায়াত করতে থাকবে। সুতরাং P-র অভিক্ষেপ Q—তার গতি পর্যাবৃত্ত—সরল দোলনের প্রথম সর্ত পূর্ণ।

P কণার ওপর PO অভিমুখে কেন্দ্রগ বল $(=m\omega^2a^2)$ সর্বদাই সক্রিয়। এই বলের দুই উপাংশ $PR=PO\cos\theta$ এবং $PQ=PO\sin\theta$; Q-এর গতিপথ AB বরাবর, সুতরাং কোসাইন উপাংশটিই মাত্র তার ওপরে

সক্রিয়। P যখন চক্রের প্রথম বা চতুর্থ পাদে তখন Q-এর ওপর বল ডান থেকে বাঁয়ে আর সে যখন দ্বিতীয় বা তৃতীয় পাদে তখন সেই সক্রিয় বলই তাকে আবার বাঁ থেকে ডানে ঠেলছে; সর্বত্রই তাহলে সক্রিয় বল মধ্যক-বিন্দু O অভিমুখী—সরল দোলনের দ্বিতীয় সর্ত পূর্ণ।

আবার এই প্রত্যানয়ক বলের মান $m\omega^2 . OP \cos\theta = m\omega^2 . a\cos\theta = (m\omega^2 a/OP).OQ = m\omega^2 . OQ = m\omega^2 x = kx$; অর্থাৎ প্রত্যানয়ক বল নিমেষ-সরণের সমানুপাতিক। অতএব সরল দোলনের তৃতীয় ও শেষ সর্তটিও পূর্ণ হ'ল।

১-৬. সরল দোলনে সরণ, বেগ ও ত্বরণ:

ক. সরণ—ধরা যাক, 1.5(a) চিত্রে গোড়ায় ($t = 0$) চক্রপথে সচল

চিত্র 1.5—সরল দোলনে সরণ

কণা A-তে ছিল, $t = t$ নিমেষে P-তে আছে; এই অবকাশে অভিক্ষেপ A থেকে স'রে Q-তে পৌঁছেছে। তাহলে মধ্যক-বিন্দু O সাপেক্ষে t অবকাশে Q-এর সরণ

$$OQ = x = a\cos\omega t \qquad (১-৬.১ক)$$

যদি আদি মুহূর্তে চক্রপথে সচল কণা E-তে থাকতো তাহলে t অবকাশে P-তে পৌঁছাতে A-র সাপেক্ষে সে $(\omega t - \phi)$ কোণ অতিক্রম ক'রত। তাহলে

$$OQ = x = a\cos(\omega t - \phi) \qquad (১-৬.১খ)$$

আর যদি আদি নিমেষে F বিন্দুতে থাকতো তাহলে O-র সাপেক্ষে সরণ

$$OQ = x = a\cos(\omega t + \varepsilon) \qquad (১-৬.১গ)$$

পক্ষান্তরে, চক্রপথে সচল কণার অভিক্ষেপ CD ব্যাস বরাবর ধরলে (চিত্র 1.5b) $t=t$ নিমেষে P-র অভিক্ষেপ O থেকে R-এ পৌঁছাতো। তখন অভিক্ষেপের সরণ

$$OR=y=a \sin \omega t \qquad (১\text{-}৬.২ক)$$

আগের মতোই সচল কণা আদি মুহূর্তে E বা F বিন্দুতে থাকলে O সাপেক্ষে সরণ দাঁড়াত

$$y=a \sin (\omega t-\phi) \qquad (১\text{-}৬.২খ)$$

এবং $y=a \sin (\omega t+\varepsilon)$ (১-৬.২গ)

১-৬.১ এবং ১-৬.২ সমীকরণগুলি থেকে বলা চলে যে আদি নিমেষে স্পন্দনশীল কণা যদি

(ক) চূড়ান্ত সরণবিন্দুতে থাকে তাহলে তার অভিক্ষেপের সরণের কোসাইন প্রতিরূপ হয় আর

(খ) মধ্যক-বিন্দুতে থাকে তাহলে অভিক্ষেপের সরণের সাইন প্রতিরূপ হয়।

তাহলে $a \cos \omega t$, $a \sin \omega t$, $a \cos (\omega t \pm \phi)$, $a \sin (\omega t \pm \phi)$ সবাই সরল দোলনে নিমেষ-সরণের প্রতিরূপ। এদের আমরা আগে ১-৪.৩ সমীকরণে পেয়েছি। এই বিশ্লেষণ থেকে সরল দোলনে, সময়ের সঙ্গে সরণের ক্রম-পরিবর্তনের রূপরেখা পরিষ্কার বোঝা যাচ্ছে। সরণের দুই অংশ—a, **সরণবিস্তার** ধ্রুবরাশি বা আর অপরটি $(\omega t+\phi)$, সময়ের সঙ্গে পরিবর্তনশীল রাশি, **দোলনদশা**। যেকোন নিমেষে কণার দোলনদশা সেই মুহূর্তে তার অবস্থান (x) এবং গতিবেগ $(\dot{x})$ নির্দেশ করে।

খ. বেগ—সরল দোলনে নিমেষ-সরণ ১-৬.১ এবং ১-৬.২-কে অবকলন ক'রে যথাক্রমে x এবং y অক্ষ বরাবর নিমেষ-বেগ মেলে—

$$v_x=\dot{x}=-\omega a \sin \omega t \text{ বা } \omega a \sin (\omega t \pm \phi) \qquad (১\text{-}৬.৩ক)$$

$$v_y=\dot{y}=\omega a \cos \omega t \text{ বা } \omega a \cos (\omega t \pm \phi) \qquad (১\text{-}৬.৩খ)$$

তাহলে যেকোন অক্ষ ξ বরাবর পাব

$$\text{সরণ } \xi=a \, {}^{\cos}_{\sin} (\omega t \pm \phi) \qquad (১\text{-}৬.৪ক)$$

$$\text{আর বেগ } \dot{\xi}=\mp \omega a \, {}^{\sin}_{\cos} (\omega t \pm \phi) \qquad (১\text{-}৬.৪খ)$$

আবার ১-৬.৩ থেকে পাব

$$\dot{x} = -\omega a \sin(\omega t \pm \phi) = -\omega a \sqrt{1-\cos^2(\omega t \pm \phi)}$$
$$= -\omega \sqrt{a^2 - a^2 \cos^2(\omega t \pm \phi)} = -\omega \sqrt{a^2 - x^2}$$
(১-৬.৫ক)

অনুরূপে $\dot{y} = \omega \sqrt{a^2 - y^2}$ (১-৬.৫খ)

এবং সাধারণভাবে $\dot{\xi} = \pm \omega \sqrt{a^2 - \xi^2}$ (১-৬.৫গ)

স্পন্দনশীল কণা যখন মধ্যক অবস্থানে তখন $\xi = 0$ এবং ১-৬.৫ অনুযায়ী বেগ তখন সর্বাধিক—তাকে বেগবিস্তার (velocity amplitude) বলি। সুতরাং

বেগবিস্তার $v_{max} = (\dot{\xi})_{max} = \pm \omega a$ (১-৬.৬)

গ. ত্বরণ—সরল দোলনে নিমেষ-ত্বরণ হবে

$$f = \dot{v} = \ddot{\xi} = -\omega^2 a \begin{matrix}\cos \\ \sin\end{matrix} (\omega t \pm \phi) = -\omega^2 \xi \quad (১-৬.৭)$$

$$f_x = \dot{v}_x = \ddot{x} = -\omega^2 x \quad (১-৬.৭ক)$$

$$f_y = \dot{v}_y = \ddot{y} = -\omega^2 y \quad (১-৬.৭খ)$$

১-৬.৭ থেকে দেখেছি যে ত্বরণ, সরণের বিপরীতমুখী ও সমানুপাতিক। আবার শেষ দুটি সমীকরণ থেকে পাই $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$ এবং $\ddot{y} + \omega^2 y = 0$ —দুই অক্ষ বরাবর সরল দোলনের অবকল সমীকরণ (১-৪.১); সুতরাং ভৌত সংজ্ঞা দিয়ে যা সুরু, জ্যামিতিক সংজ্ঞায় তা শেষ (১-৪ অনুচ্ছেদ) এবং বিপরীতক্রমে—অর্থাৎ সংজ্ঞা-দুটি পরস্পর বিনিময়; সে কথা আগেই বলা হয়েছে।

লক্ষণীয় যে, ১-৪.১ সমীকরণে একক সরণে প্রত্যানয়ক ত্বরণের বর্গমূল $\sqrt{s/m}$, এখানে চক্রপথিক কণার সুষম কৌণিক বেগের (ω) সমান।

উদাহরণ—(১) $x = 5 \sin(3\pi t + \pi/3)$ সমীকরণ অনুযায়ী কোন কণার সরল দোলন হতে থাকলে $t = 3$ সে পরে তার সরণ, বেগ, ত্বরণ, কৌণিক কম্পাংক, বেগবিস্তার এবং দশাকোণ কত কত?

সমাধান—$x = 5 \sin(9\pi + \pi/3)$

$$= 5 \sin(8\pi + 240°) = 5 \sin 240°$$
$$= 5 \times (-\sqrt{3}/2) = -4.33 \text{ সেমি}$$

$$v=\dot{x}=5\times 3\pi\ (\cos 9\pi+\pi/3)$$
$$=15\pi\cos(8\pi+240^\circ)=15\pi\cos 240^\circ$$
$$=15\times 3\pi\times(-1/2)=-23.56 \text{ সেমি/সে}$$
$$f=\ddot{x}=-\omega^2 x=-9\pi^2\times 5\sin(3\pi t+\pi/3)$$
$$=-9\pi^2\times(-4.33)=384 \text{ সেমি/সে}^2$$
$$\omega=3\pi \text{ রেডি/সে}$$
$$v_{max}=\omega a=3\pi\times 5=47.10 \text{ সেমি/সে}$$
$$\text{দশাকোণ}=(\omega t+\phi)=9\pi+\pi/3=28\pi/3 \text{ রেডিয়ান}$$

(২) সরল দোলনরত কোন কণা মধ্যক-বিন্দু থেকে 3 সেমি ও 4 সেমি দূরের দুই বিন্দু যথাক্রমে 16 সেমি/সে এবং 12 সেমি/সে বেগে অতিক্রম করলে তার সরণবিস্তার ও কম্পাংক কত কত ?

সমাধান—ধরা যাক, এখানে সরণ $x=a\sin\omega t=a\sin 2\pi nt$

তাহলে $v=\dot{x}=2\pi na\cos 2\pi nt=2\pi n\sqrt{a^2-x^2}$

$\therefore\quad 16^2=4\pi^2n^2(a^2-9)$ এবং $12^2=4\pi^2n^2(a^2-16)$

$\therefore\quad \dfrac{a^2-16}{a^2-9}=\dfrac{12^2}{16^2}$ বা $a=5$ সেমি

আবার $n^2=12^2/4\pi^2(a^2-16)$ বা $n=2/\pi$ প্রতি সেকেণ্ডে

প্রশ্ন—(১) দেখাও যে সরল দোলনরত কণার সরণবিস্তারের $\sqrt{3}/2$ দূরত্বে তার বেগ বেগবিস্তারের অর্ধেক।

(২) সরল দোলনে সরণবিস্তার 8 সেমি এবং দোলনকাল 1.57 সে হলে তার বেগবিস্তার এবং ত্বরণ কত কত ? 4 সেমি সরণেই বা তার বেগ এবং ত্বরণ কত কত হবে ?

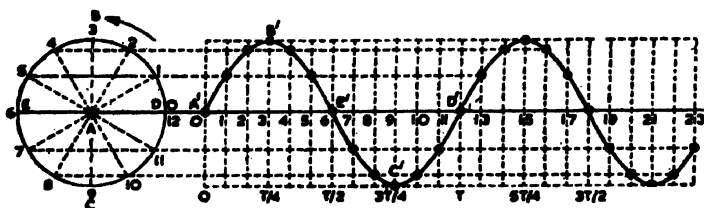
[উঃ 32 সেমি/সে, 128 সেমি/সে^{2}, 27.7 সেমি/সে, 64 সেমি/সে^{2}]

(৩) $x=5\sin(0.5t+86^\circ 52')$ হলে আদি সরণ বেগ ও ত্বরণ কত কত ? ($n=\frac{1}{4}\pi$/সে ধর)।

[উঃ 5 মি, 2.5 মি/সে, 1.25 মি/সে^{2}]

১.৭. সরল দোলনের লেখচিত্র :

সরল দোলনে কালসাপেক্ষে সরণ, বেগ ও ত্বরণের মধ্যে সম্পর্ক লেখচিত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করলে বোঝা সহজ হয়। সরল দোলনের মধ্যক অবস্থানকে কেন্দ্র আর সরণবিস্তারকে ব্যাসার্ধ ধ'রে বৃত্ত আঁকলে তাকে সরল দোলনের নির্দেশ (reference)-বৃত্ত বলে।

1.6 চিত্রে DBECD চক্রপথে, ধরা যাক, কণা সুষম কৌণিক বেগে বামাবর্তে ঘুরছে। y-অক্ষ বরাবর ABACA পথে তার অভিক্ষেপ আনাগোনা

চিত্র 1.6—সরল দোলনের কাল-সরণ লেখচিত্র

করবে। বৃত্ত-পরিধিকে 12টি সমান ভাগে ভাগ করা হয়েছে (0 এবং 12 দুই-ই D বিন্দুতে)। ED-কে ডান দিকে বাড়িয়ে দিয়ে এবং A' মূলবিন্দু ধ'রে সরলরেখাটিকে অনেকগুলি সমান ভাগে ভাগ করা হয়েছে। এই রেখাটিকে কাল-অক্ষ নেওয়া হয়েছে আর প্রতিটি ভাগ T/12 কালান্তর নির্দেশ করে। চক্রপথিক কণার অভিক্ষেপকে দোলক বলতে পারি।

ধরা যাক, আদি মুহূর্তে চক্রপথিক কণা D বিন্দুতে আর তার অভিক্ষেপ A বিন্দুতে রয়েছে ; নির্দেশ-কণা D থেকে পরিধি বরাবর $\omega(=2\pi/T)$ সুষম কৌণিক বেগে B-র দিকে এগোতে থাকলে 1, 2, 3 যথাক্রমে T/12, 2T/12, 3T/12 কালান্তরে তার অবস্থান সেই সেই নিমেষে AB-র ওপর দোলকের অবস্থান সূচিত করে। A থেকে এই অবস্থানের দূরত্ব AB বরাবর অভিক্ষেপের নিমেষ-সরণ। x- বা কাল-অক্ষের 1, 2, 3 চিহ্নিত বিন্দু থেকে সেই সেই নিমেষ-সরণের সমদৈর্ঘ্য লম্ব তোলা হ'ল। এই লম্বগুলির শীর্ষ যোগ করলে একটি বক্ররেখা পাওয়া যায়। এইভাবে পরিধি আর কাল-অক্ষের একই সংখ্যাযুক্ত লম্বগুলির ছেদবিন্দুগুলির মধ্যে দিয়ে বক্ররেখা টানলে সরল দোলনের কাল-সরণ লেখ (time-

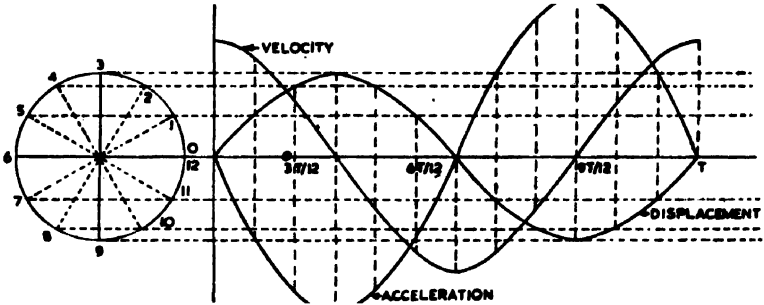
displacement curve) মেলে ; তার ভুজ, কাল বা সময় (t) আর কোটি, নিমেষ-সরণ (y বা ξ)। রেখাটি sine-লেখের অনুরূপ। আবার B বিন্দু থেকে যদি সরণ গণনা সুরু হয় তাহলে কাল-সরণ রেখা কোসাইন লেখের মতো হবে। 2.1 চিত্রে নর্তনশীল স্প্রিং-এর দোলন থেকে কাল-সরণ বক্র আঁকার ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে।

এখন যদি ধরা হয় সরণ $y = a \sin \omega t$

তাহলে বেগ $\dot{y} = \omega a \cos \omega t = \omega a \sin (\omega t + \pi/2)$

এবং ত্বরণ $\ddot{y} = -\omega^2 a \sin \omega t = -\omega^2 a \sin(\omega t + \pi)$

তাহলে দেখছি যে, সরণ আর বেগের মধ্যে $\pi/2$ বা $T/4$ দশাভেদ, বেগ আর ত্বরণের মধ্যেও তাই, আর সরণ ও ত্বরণের মধ্যে দশাভেদ π তথা $T/2$; তাই বলা হয়, সরণ আর বেগ এবং বেগ ও ত্বরণের মধ্যে পাদান্তর (in quadrature) দশা আর সরণ ও ত্বরণ বিপরীত দশায় থাকে। 1.7 চিত্রে এই পারস্পারিক সম্পর্ক দেখানো হয়েছে।

সরল দোলনের নির্দেশ-বৃত্ত সরল দোলনের ভৌত ও জ্যামিতিক দৃষ্টি-কোণের মধ্যে যোগসূত্র। তার (ক) ব্যাসার্ধ a, দোলনের সরণবিস্তার

চিত্র 1.7—সরল দোলনের সরণ, বেগ ও ত্বরণের লেখচিত্র

(খ) পরিধি বরাবর কৌণিক বেগ ω, একক সরণে প্রত্যানয়ক ত্বরণের বর্গমূলের সমান (গ) পরিধি বরাবর আবর্তন-কাল, দোলনের পর্যায়কালের সমান এবং (ঘ) এক সেকেণ্ডে আবর্তন সংখ্যা, দোলন-কম্পাংকের সমান।

১-৮. সরল দোলনে শক্তি :

দোলককণা সচল ব'লে প্রতি নিমেষেই তার গতিশক্তি বদলাচ্ছে ; আবার প্রতি বিন্দুতেই তার অবস্থান বা দোলন-অবস্থা বদলাচ্ছে কাজেই তার স্থিতিশক্তিও বদলাচ্ছে। নর্তনশীল স্প্রিং-এর কথাই ধর ; তার প্রান্তিক ভর সচল ব'লে স্প্রিং-এ সর্বদাই গতিশক্তি রয়েছে ; প্রতি নিমেষেই তার বেগ বদলাচ্ছে ব'লে গতিশক্তিও বদলাচ্ছে। আবার চলার প্রতি মুহূর্তে তার প্রসারণ বা সংকোচন, স্থিতিস্থাপক বলের বিরুদ্ধে কাজ করছে এবং সেই কাজ পরিবর্তনশীল স্থিতিশক্তি রূপে স্প্রিং-এ জমা থাকছে ; খালি, ভর যখন মধ্যকবিন্দু পার হচ্ছে তখন স্প্রিং-এর দৈর্ঘ্য স্বাভাবিক ব'লে সেই মুহূর্তে স্থিতিশক্তি থাকে না। কিন্তু সেই নিমেষে সরণ শূন্য, বেগ চরম, কাজেই গতিশক্তিও চরম। আবার স্পন্দনের শেষ দুই বিন্দুতে সংকোচন বা প্রসারণ চূড়ান্ত, সুতরাং সেখানে গতি ক্ষণিকের জন্য থেমে যায়, কাজেই গতিশক্তি নেই ; আর স্প্রিং-এর বিকৃতি সর্বাধিক সুতরাং স্থিতিশক্তিও সবচেয়ে বেশী। সরল দোলকের বেলাতেও অনুরূপ অবস্থা ; দোলকপিণ্ড মধ্যকবিন্দু ছাড়া সর্বত্রই অল্পাধিক উঁচুতে থাকে, কাজেই কমবেশী অভিকর্ষীয় স্থিতিশক্তি তার চলার পথের প্রতি বিন্দুতেই থাকবে, দোলনের দুই প্রান্তবিন্দুতে সর্বাধিক, মধ্যক-বিন্দুতে শূন্য। এই দুই প্রান্তবিন্দুতে দোলকপিণ্ড ক্ষণিকের জন্য থেমে যাচ্ছে, গতিশক্তি নেই ; যে যতই মধ্যকবিন্দুর দিকে আসে ততই গতিশক্তি বাড়তে থাকে, ঐ বিন্দুতে সবচেয়ে বেশী হয়। কাজেই দেখছি যে, (ক) দোলনের মধ্যক-বিন্দুতে গতিশক্তি চরম, স্থিতিশক্তি নেই (খ) দুই প্রান্তবিন্দুতে গতিশক্তি নেই, স্থিতিশক্তি চরম আর (গ) পথের অন্য যে-কোন বিন্দুতে দুই-ই অল্পাবিস্তর পরিমাণে আছে। **দোলনপথের প্রতি বিন্দুতেই দুই শক্তির সমষ্টি সমান থাকে।**

যেকোন নিমেষে সচল কণার গতিশক্তি [১-৬.৫(ক) দেখ]

$$K=\tfrac{1}{2}mv^2=\tfrac{1}{2}m\dot{x}^2=\tfrac{1}{2}m\omega^2(a^2-x^2) \qquad (১\text{-}৮.১)$$

আবার ঐ কণার x সরণ হয়ে থাকলে প্রত্যানয়ক ত্বরণ $\ddot{x}=-\omega^2x$ এবং প্রত্যানয়ক বল $m\omega^2x$ পরিমাণ হবে। এই বলের বিরুদ্ধে কণাকে সামান্য সরণ dx দিতে হলে $m\omega^2x\,dx$ পরিমাণ কাজ ঐ কণার ওপরে করতে হবে ; সেই কৃতকার্যই কণার স্থিতিশক্তির বৃদ্ধি। তাহলে মধ্যক-বিন্দু থেকে x দূরত্ব পর্যন্ত আসতে কণার স্থিতিশক্তির সঞ্চয়

$$V=\int_0^x m\omega^2x.\,dx=m\omega^2\int_0^x x.dx=\tfrac{1}{2}m\omega^2x^2 \qquad (১\text{-}৮.২)$$

তাহলে দোলনপথের যেকোন বিন্দুতে বা দোলনকালের যেকোন নিমেষে সচল কণার মোট শক্তির পরিমাণ দাঁড়াচ্ছে

$$K+V=\tfrac{1}{2}m\omega^2(a^2-x^2)+\tfrac{1}{2}m\omega^2x^2=\tfrac{1}{2}m\omega^2a^2 \quad (১\text{-}৮.৩)$$

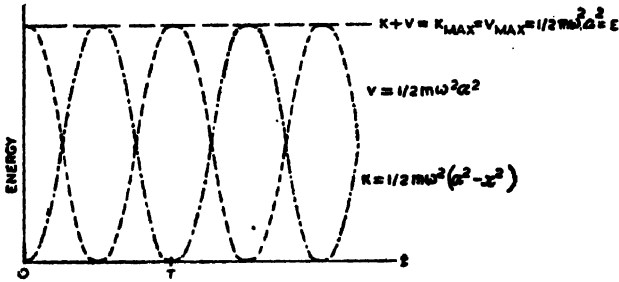
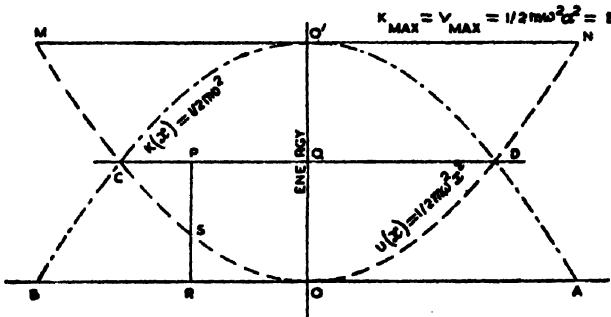
দেখ m, ω, a প্রত্যেকেই নিত্যরাশি সুতরাং দোলককণার মোট শক্তি অপরিবর্তিত থাকছে। কাজেই **সরল দোলনীব্যবস্থা সংরক্ষী তন্ত্র**—সে কথা ১-২ অনুচ্ছেদেই বলা হয়েছে। সুতরাং সরল দোলনে শক্তির অপচয় হয় না, কেবলমাত্র গতি থেকে স্থিতীয় এবং স্থিতীয় থেকে গতীয় এই রূপান্তরই পর্যায়ক্রমে হতে থাকবে। এই রকম তন্ত্র বাস্তবে অকর্মণ্য, কেননা সে শক্তি বিকীরণ করে না, শব্দ, আলো বা তাপ কিছুই দেয় না। আসলে এই সরল দোলন আদর্শ ও অবাস্তব কল্পনা—যেকোন সচল তন্ত্রেই অল্পাবিস্তর শক্তিক্ষয় হয়। সেই **অপচিত শক্তির কিছুটা বিকিরীত শক্তি** হিসাবে পাওয়া যায়।

১-৮.১ সমীকরণে $x=0$ হলে গতিশক্তির মান $\tfrac{1}{2}m\omega^2a^2$ হয়, স্পষ্টতই তা গতিশক্তির চরমমান। আবার ১-৮.২ সমীকরণে $x=a$ হলে স্থিতিশক্তির মানও $\tfrac{1}{2}m\omega^2a^2$, স্পষ্টতই তারও চরম মান। ১-৮.৩ সমীকরণ থেকে দেখছি যেকোন নিমেষে মোট শক্তির মানও $\tfrac{1}{2}m\omega^2a^2$ হচ্ছে; অর্থাৎ যেকোন নিমেষে গতি ও স্থিতিশক্তির যোগফল স্থিতি- বা গতি-শক্তির চরম মানের সমান। মধ্যক-বিন্দুতে সচল কণার গতিশক্তি আর প্রান্তবিন্দুতে তার স্থিতিশক্তি চরমমান। 1.8(a) চিত্রে স্পন্দনকালের প্রতি নিমেষে গতিশক্তি আর স্থিতিশক্তির পরিবর্তনের রূপরেখা এবং যোগফল দেখানো হয়েছে।

1.8(b) চিত্রে সরণ (x) এবং স্থিতি-(V) ও গতি-(K) শক্তির মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। সমীকরণ ১-৮.১ এবং ১-৮.২-এর প্রকৃতি থেকেই দেখা যাচ্ছে উৎপন্ন বক্র পরবলয়াকার (parabolic) হবে; (b) চিত্রে তারা যথাক্রমে $AO'B$ এবং MON; কোন স্পন্দনশীল কণার মোট শক্তি যদি OQ কোটি দিয়ে নির্দিষ্ট করা হয় তাহলে কণাটি CD রেখা বরাবর স্পন্দিত হচ্ছে ব'লে ধরা যায়। তার কোন বিন্দু P-তে, কণার স্থিতিশক্তির মাপ RS আর গতিশক্তির মাপ SP হবে। পথের দুই প্রান্ত C এবং D-কে শক্তির সবটাই গতীয় আর মধ্যক-বিন্দু O-তে সবটাই গতীয়। লক্ষ্য কর, যেকোন বিন্দুতেই দুই কোটি অর্থাৎ দুই জাতীয় শক্তির সমষ্টি সমান; অর্থাৎ শক্তি সংরক্ষিত থাকছে। এই কণার ক্ষেত্রে COD পরবলয়কে বিভব কূপ (potential well) বলে।

শক্তির যেকোন নিমেষের মোট মাপ থেকে সরল দোলনের অবকল সমীকরণ স্থাপন সম্ভব। যেমন ১-৮.১ এবং '২ থেকে

$$K + V = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 = \text{ধ্রুবক}। \quad \text{তাহলে}$$

$$\dot{x}^2 + \omega^2 x^2 = \text{ধ্রুবক বা } 2\dot{x}\ddot{x} + 2\omega^2 \dot{x}x = 0 \text{ বা } \ddot{x} + \omega^2 x = 0$$

চিত্র 1-8(*a*)—সরল দোলনে শক্তির বিন্যাস

চিত্র 1.8(*b*)—দোলনশক্তির পরবলয় ও বিভবকূপ

উদাহরণ—10 গ্র্যাম ভরের কণাকে তার মধ্যক-বিন্দু থেকে 50π সেমি/সে বেগসহ ঠেলে দিলে সে এক সেকেণ্ড পরে ক্ষণিকের জন্যে থেমে যায়। তার সরল দোলনের সমীকরণ কি? সরণের প্রান্তবিন্দুতে চরম প্রত্যানয়ক বল, চরম স্থিতিশক্তি এবং অর্ধ সরণবিস্তারে গতিশক্তির মান কত কত হবে?

সমাধান—যদি সরণবিস্তার x_0, বেগবিস্তার v_0 এবং প্রত্যানয়ক ত্বরণ-গুণাংক ω ধরি, তবে

$$x = x_0 \cos \omega t + (v_0/\omega) \sin \omega t \quad [১\text{-}৪.৫]$$

এখানে $v_0 = 50\pi$ সেমি/সে আর $T/4 = 1$ সে

তাহলে $\omega = 2\pi/T = \pi/2$

সরণের সুরুতে $x_0 = 0$,

$$\therefore \qquad x = (v_0/\omega)\sin\omega t = 100 \sin \pi t/2 \text{ সেমি}$$

তাহলে সরণবিস্তার $x_{max} = v_0/\omega = 100$ সেমি $= a$

চরম প্রত্যানয়ক বল $P = m\omega^2 x_{max} = 10 \times \pi^2/4 \times 100$

$= 250\pi^2$ ডাইন

চরম স্থিতিশক্তি $V_{max} = \frac{1}{2}m\omega^2 a^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times (\pi^2/4) \times 100^2$

$= 12{,}500\pi^2$ আর্গ

অর্ধবিস্তারে গতিশক্তি $K_{a/2} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2(a^2 - a^2/4)$

$= \frac{1}{2} \times 10 \times \pi^2/4 \times \frac{3}{4} \times 100^2$

$= 9375\pi^2$ আর্গ

১-৯. স্পন্দনদশা (Phase) :

1.6 চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে, একবার পূর্ণ দোলনের মধ্যে স্পন্দনশীল কণার সরণ একটা নির্দিষ্ট পরম্পরা (sequence) বা অনুক্রমে প্রতি নিমেষেই বদলাতে থাকে। 1.7 চিত্রে দেখি যে সরণের সঙ্গে সঙ্গে বেগ এবং ত্বরণও অনুরূপভাবেই পরিবর্তিত হচ্ছে। আমরা বলি যে, সরণ বেগ আর ত্বরণের অনবরতই দশান্তর ঘটছে। **এই পরিবর্তন-পরম্পরায় যেকোন নিমেষে কণার সরণ বেগ বা ত্বরণের মান যে পরিবর্তী রাশি থেকে পাওয়া যায় তাকে দশা বলে।** ১-৪.৩ আর ১-৬.১ ও ১-৬.২ সমীকরণগুলিতে সরণের প্রতিরূপে (expression) সাধারণভাবে $(\omega t \pm \phi)$ রাশিটি সময়ের সঙ্গে কেবলই বদলায়। বেগ এবং ত্বরণের ভেদও এই রাশিটির উপর নির্ভর করে। কাজেই এই রাশিটিই কোন মুহূর্তে স্পন্দনদশা নির্দেশ করে। স্পন্দনদশা কোন নিমেষে সচল কণার গতীয় অবস্থা নিয়ন্ত্রণ করে। দশা জানা থাকলে সেই মুহূর্তে কোন কণার অবস্থান, দ্রুতি ও গতিমুখ জানা সম্ভব।

দুটি স্পন্দমান কণা যদি একই ক্ষণে এবং একই দিকে কোন বিন্দু অতিক্রম করে, তবে তাদের বেগ আলাদা হলেও তারা **সমদশা**; সেই মুহূর্তেই কণাদুটি যদি বিপরীতমুখী থাকে তবে তারা **বিপরীত দশা**। যদি কণা দুটি মধ্যক-বিন্দুর একই পাশে একই ক্ষণে সরণপ্রান্তে পৌঁছয় তবে তারা সমদশা;

আর সেই মুহূর্তে যদি তারা সরণপথের দুই ভিন্ন প্রান্তে থাকে, তবে তারা বিপরীত দশা। 1.7 চিত্রে দেখ যেকোন নিমেষে সরণ এবং ত্বরণ বিপরীতমুখী তাই তারা বিপরীত দশা ($\ddot{\xi} = -\omega^2 \xi$) ; আর ক্ষণিক সরণ ও বেগ এবং একই সময়ে বেগ এবং ত্বরণের মধ্যে পাদান্তর ($\pi/2$) দশা।

সরল দোলনে ($\omega t \pm \phi$) রাশিটি দিয়েই দশা মাপা যায় এবং তাকে **দশাকোণ** বলে। সুরুতে $t=0$; তাই ϕ আদিদশা (epoch) নির্দেশ করে। সরল দোলনের নির্দেশ বৃত্তের (1.6 চিত্র) ED বা BC অক্ষসাপেক্ষে ঘূর্ণমান ব্যাসার্ধের কোণই দশাকোণ মাপে। ১-৬.৪(ক) সমীকরণ থেকে তার মান পাচ্ছি

$$\omega t \pm \phi = \begin{matrix}\sin^{-1} \\ \cos^{-1}\end{matrix} (\xi/a) \qquad (১\text{-}৯.১)$$

অতএব কোন ক্ষণে স্পন্দনশীল কণার সরণ এবং তার বিস্তারের অনুপাত দিয়ে সেই নিমেষে দশা মাপা যায়।

আবার স্পন্দনের পর্যায়কাল T হ'লে, নির্দেশ বৃত্তে চক্রপথিক কণার সুষম কৌণিক বেগ ω-র সঙ্গে তার সম্পর্ক $\omega = 2\pi/T$ হয় ; তাহলে $\omega t = 2\pi . t/T$, কাজেই সচল কণার নিমেষ-দশা, t/T অনুপাত [অর্থাৎ আদি মুহূর্ত থেকে অতিক্রান্ত সময় (t) এবং পর্যায়কালের (T) অনুপাত] দিয়েও মাপা যায়।

উদাহরণ—কোন কণার দোলন সমীকরণ $x = 5 \sin(\omega t + \phi)$, পর্যায়কাল 20 সে ; $x = 2$ সেমি সরণ থেকে যদি স্পন্দন সুরু হয়, তাহলে আদ্য দশা কত ? $x = 3$ সেমি হলে দশাকোণ কত ? 5 সে অন্তরে কণার দুই অবস্থানের মধ্যে দশাভেদই বা কত ?

সমাধান—প্রদত্ত সর্তানুসারে

(ক) $t = 0$ নিমেষে, সরণ $2 = 5 \sin \phi$ অর্থাৎ

$$\phi = \sin^{-1} \tfrac{2}{5} = 23°35'$$

(খ) এখানে $3 = 5 \sin(\omega t + \phi)$; তাই দশাকোণ

$$(\omega t + \phi) = \sin^{-1} \tfrac{3}{5} = 36°52'$$

(গ) দশাভেদ $= (\omega t_2 + \phi) - (\omega t_1 + \phi_1) = \omega(t_2 - t_1)$

$$= (2\pi/T)(t_2 - t_1) = (2\pi/20) \times 5$$

$$= \pi/2 \text{ রেডিয়ান।}$$

প্রশ্ন—সরল দোলনরত এক কণার দোলন সমীকরণ

$$x = 2.5 \cos\left(\frac{2\pi}{128}t + \phi\right)$$

এবং $x_0 = 0.5$ সেমি। তার দশাকোণ কত ? 1.5 সে কালান্তরে কণার দুই অবস্থানের মধ্যে দশান্তরই বা কত ? [উঃ $11°32'$; $3\pi/128$ রেডিয়ান]

১-১০. দোলনে পর্যায়কাল :

সরল দোলনী কণা তার চলার পথের যেকোন বিন্দু, একই দিকে পরপর অতিক্রম করতে যে সময় নেয়, তাকে দোলনের পর্যায়কাল বলে।

t এবং $t+T$ এই দুই নিমেষে সরল দোলনে সরণের মান হবে যথাক্রমে $x_t = a \cos(\omega t + \phi)$ এবং $x_{t+T} = a \cos[\omega(t+T)+\phi]$

যদি $\omega T = 2\pi$ ধরি, তাহলে পাব

$$x_{t+T} = a \cos[\omega t + 2\pi + \phi] = a \cos(\omega t + \phi) = x_t$$

অর্থাৎ $T = 2\pi/\omega$ সে অন্তর অন্তর সরণের মান (x_t) পুনরাবৃত্ত হচ্ছে। সরল দোলনের নির্দেশ-বৃত্তে (1.6 চিত্রে) এক সেকেণ্ডে ω মানের কোণ বর্ণিত হচ্ছে আর T সেকেণ্ডে চক্রপথে কণার একবার আবর্তন হচ্ছে অর্থাৎ 2π রেডিয়ান কোণ বর্ণিত হচ্ছে ; কাজেই সেখানে $T = 2\pi/\omega$ সে। অতএব সরল দোলনে ω, প্রত্যানয়ক ত্বরণ-গুণাংকের বর্গমূলের সমান ; এই সম্পর্ক (১-৬ অনুচ্ছেদের শেষ লাইন দেখ) মনে রেখে লেখা যায়, পর্যায়কাল

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{s}} = 2\pi\sqrt{\frac{\text{স্পন্দকের ভর}}{\text{একক সরণে প্রত্যানয়ক বল}}} \quad (১\text{-}১০.১)$$

$$= 2\pi\sqrt{\frac{\text{জড়তা গুণাংক}}{\text{প্রত্যানয়ক গুণাংক}}}$$

$$= 2\pi\sqrt{\frac{\text{জড়তা-গুণাংক (Inertia factor)}}{\text{দার্ঢ্য-গুণাংক (Spring factor)}}} \quad (১\text{-}১০.২)$$

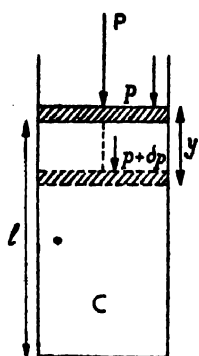
$$= \frac{2\pi}{\sqrt{\text{একক সরণে প্রত্যানয়ক ত্বরণ}}} \quad [\text{ কেননা ত্বরণ} = \text{বল/ভর }] \quad (১\text{-}১০.৩)$$

দার্ঢ্য-গুণাংক—ভারাক্রান্ত স্প্রিং-এর নিম্নপ্রান্তের স্পন্দন সরল দোলনী এবং সেক্ষেত্রে প্রত্যানয়ক বল প্রকৃতিতে স্থিতিস্থাপক অর্থাৎ, তার মান

সরণের আনুপাতিক। তাই, প্রত্যানয়ক বল সরণের আনুপাতিক হলেই বিজ্ঞানীরা তাকে স্থিতিস্থাপক-কল্প (quasi-elastic) বল বলেন, তা সে প্রকৃতিতে স্থিতিস্থাপক না হলেও। তাই একক সরণে প্রত্যানয়ক বল তথা প্রত্যানয়ক-গুণাংককে spring বা rigidity (দার্ঢ্য) factor বলা হবে (প্রসারিত স্প্রিং-এর দার্ঢ্য-গুণাংকের কথা মনে রেখেই)—যদিও বহু সরল দোলনই স্থিতিস্থাপক ধর্মপ্রসূত নয়। পরের অনুচ্ছেদে আমরা সরল দোলনের নানা উদাহরণ আলোচনা ক'রব—তাদের মধ্যে ক-শ্রেণীর বাইরে কোন দোলনই স্থিতিস্থাপকতাজনিত নয়।

১-১১. সরল দোলনের উদাহরণ :

সরণের সমানুপাতী প্রত্যানয়ক বলের উদাহরণ পদার্থবিদ্যায় অজস্র। স্থিতিস্থাপকতা, অভিকর্ষ, প্রবাহী মাধ্যমে প্লবতা, চৌম্বক ক্ষেত্র, বৈদ্যুতিক স্বাবেশ প্রভৃতি বিচিত্র ভৌত ধর্ম, প্রত্যানয়ক তথা দার্ঢ্য-বল যোগায়। উৎপন্ন দোলনের প্রকৃতি অনুদৈর্ঘ্য, অনুপ্রস্থ বা ব্যাবর্ত (torsional)-জাতীয় হতে পারে ; দোলনপথ সরলরেখা বরাবর বা কোন বৃত্তচাপ বরাবর হতে পারে, অর্থাৎ দোলন রৈখিক বা কৌণিক হতে পারে। এখানে কয়েকটি মাত্র উদাহরণই দেওয়া সম্ভব।

ক. স্থিতিস্থাপক প্রত্যানয়ন : (১) সিলিণ্ডারে আবদ্ধ গ্যাসের স্পন্দন—

1.9 চিত্রে C সিলিণ্ডারে, ধরা যাক খানিকটা গ্যাস আছে। মনে কর, হাতলযুক্ত কিন্তু ভারহীন এক পিস্টন গ্যাসের ওপরে রয়েছে এবং সেটি বিনা ঘর্ষণেই ওঠানামা করতে পারে। পিস্টন, ওপরে বায়ুমণ্ডলের চাপ (P) এবং নিচে গ্যাসের ঊর্ধ্বমুখী চাপের ক্রিয়ায় স্থির থাকুক। গ্যাসস্তম্ভের দৈর্ঘ্য l, প্রস্থচ্ছেদ a এবং গ্যাসের আয়তন-বিকার-গুণাংক B ধরা হ'ল। এবার δp চাপ প্রয়োগ ক'রে পিস্টনকে y দূরত্ব নামালে স্থিতিস্থাপক বল উৎপন্ন হয়ে তাকে ওপরে ঠেলবে। এখন হুকের সূত্রানুযায়ী

চিত্র 1.9—সিলিণ্ডারে আবদ্ধ গ্যাসের স্পন্দন

$$B=\frac{\text{পীড়ন}}{\text{বিকৃতি}}=\frac{\delta p}{-\delta v/v}=\frac{\delta p}{-ay/la}$$

$$\delta p=-\frac{B}{l}y$$

তাহলে পিস্টনের ওপর সক্রিয় বল $\alpha.\delta p$ আর গ্যাসের ভর $l\alpha\rho$ হয় ; সুতরাং জড়তা-বল দাঁড়াবে

$$m\ddot{y}=\alpha.\delta p \quad \text{বা} \quad l\alpha\rho\ddot{y}=\alpha(-B/l)y=-\frac{B\alpha}{l}y$$

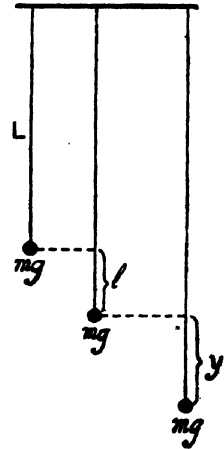
অর্থাৎ প্রত্যানয়ক বল সরণানুপাতী। ফলে পিস্টনটি গ্যাস-ভরের ওপর (বাড়ির ডানলোপিলো গদির ওপর শিশুর মতো) ওঠানামা করতে থাকবে— এই **সরল দোলন, রৈখিক**। তার পর্যায়কাল

$$T=2\pi\sqrt{\frac{\text{জড়তা-গুণাংক}}{\text{দাঢ্য´-গুণাংক}}}=2\pi\sqrt{\frac{l\alpha\rho}{B\alpha/l}}=2\pi\ \sqrt{\rho l^2/B} \qquad (১\text{-}১১.১)$$

বাস্তবে পিস্টনের স্পন্দন ঘর্ষণহীন হতে পারে না ; সুতরাং পিস্টনের স্পন্দন আসলে হবে মন্দিত বা ক্ষয়িষ্ণুবিস্তার আন্দোলন। আয়তন-বিকার-গুণাংক (B) এখানে প্রত্যানয়ক।

(২) **রশির বা স্প্রিং-এর অনুদৈর্ঘ্য আন্দোলন**—1.10 চিত্রে L দৈর্ঘ্যের একটি **ভারহীন** রশি বা দড়ির এক প্রান্ত দৃঢ়ভাবে আটকানো আর তার নিচের প্রান্তে mg ভারের একটি ছোট বল বাঁধা, দেখানো হয়েছে। ভারের ক্রিয়ায় রশিটির দৈর্ঘ্য l বেড়েছে। এখন রাশিটির প্রস্থচ্ছেদ α আর তার উপাদানের ইয়ং-গুণাংক q ধরলে লেখা যায়

$$mg=q\alpha l/L \quad \text{বা} \quad m=(q\alpha/gL)l$$

কেননা রশির প্রসারণ বা বিকৃতির (l/L) দরুন উৎপন্ন পীড়ন বল ঊর্ধ্বমুখে ক্রিয়া ক'রে mg ভারকে প্রশমিত করেছে। এবারে মনে কর, নিচের দিকে F বলে টেনে রশির দৈর্ঘ্য আরও y বাড়ানো হ'ল। তখন হুকের সূত্রানুযায়ী

চিত্র 1.10—আন্দোলিত রশি

$$q=\frac{F/\alpha}{-y/L} \quad \text{বা} \quad F=-\frac{q\alpha}{L}y$$

এবারে ভারটিকে ছেড়ে দিলে সে F-এর সমান, বাড়তি পীড়ন-বলের ক্রিয়ায় ওপরে উঠে যেতে চাইবে। যেহেতু F এবং y সমানুপাতিক, m ভরের সরল দোলন হবে ; কেননা

$$m\ddot{y} = -\frac{q\alpha}{L}y \quad \text{বা} \quad \frac{q\alpha}{gL}l\ddot{y} = -\frac{q\alpha}{L}y$$

$$\therefore \quad \text{পর্যায়কাল} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{\text{জড়তা-গুণাংক}}{\text{দার্ঢ্য-গুণাংক}}}$$

$$= 2\pi\sqrt{\frac{q\alpha l/gL}{q\alpha/L}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (১\text{-}১২.২)$$

দেখা গেল যে, পর্যায়কাল সরল দোলকের মতই, খালি তফাৎ এই যে, l এখানে ভারের ক্রিয়ায় রশির বর্ধিত দৈর্ঘ্য ; ইয়ং-গুণাংক এখানে প্রত্যানয়ক।

রশির ভর—স্বভাবতই রশি ভারহীন হতে পারে না। ধরা যাক, তার ভর m' এবং একক দৈর্ঘ্যের ভর μ, আর রশির নিম্নপ্রান্তের আদ্য বেগ $\dot{y}$; তখন রশির বদ্ধপ্রান্ত থেকে λ দূরত্বে তার এক ক্ষুদ্রাংশের দৈর্ঘ্য $d\lambda$ ধরলে সেই ক্ষুদ্রাংশের নিমেষ-বেগ স্বভাবতই $(\dot{y}/L)\lambda$ এবং গতিশক্তি $\frac{1}{2}\mu.d\lambda\,(\dot{y}\lambda/L)^2$ দাঁড়াচ্ছে। সুতরাং গোটা রশিটির গতিশক্তি হবে

$$\tfrac{1}{2}m'v^2 = \tfrac{1}{2}\int_0^L \mu.d\lambda.\left(\dot{y}\frac{\lambda}{L}\right)^2 = \tfrac{1}{2}\mu\left(\frac{\dot{y}}{L}\right)^2\int_0^L \lambda^2.d\mu$$

$$= \tfrac{1}{2}\mu\dot{y}^2\frac{L}{3} = \frac{1}{2}\frac{\mu L}{3}.\dot{y}^2 = \frac{1}{2}\frac{m'}{3}\dot{y}^2$$

সুতরাং রশির স্পন্দনের জাড্য-গুণাংক দাঁড়াবে $(m + m'/3)$; তাই রশির ভর হিসাবে নিলে পর্যায়কাল হবে

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{(m + m'/3)L}{q\alpha}}$$

1.1 চিত্রের হালকা স্প্রিং-এর নর্তনও এই বিশ্লেষণমতোই হবে। এক্ষেত্রে স্পন্দনও রৈখিক। [এখানে স্প্রিং-এর ব্যাবর্ত দোলন অগ্রাহ্য]

(৩) **ব্যাবর্ত দোলক**—দৃঢ় অবলম্বন থেকে একটা সরু লম্বা তার ঝুলিয়ে দিয়ে তার নিচের প্রান্তে একটা ভারী চাকতি বা বেলন বেঁধে দিলে ব্যাবর্ত দোলক হয়। এদের ঘুরিয়ে তারে মোচড় দিয়ে ছেড়ে দিলে, তারটি ক্রমান্বয়ে পাক খেতে আর খুলতে থাকে—এই গতিই ব্যাবর্ত দোলন। তারটিকে পাকাতে বেলন বা চাকতিতে দ্বন্দ্ব (torque) প্রয়োগ করলে তারে কৃন্তন-বিকৃতি ঘটে। মোচড় বা পাকের জন্য বিকৃতি θ রেডিয়ান হ'লে পীড়ন-দ্বন্দ্বের মান বিকৃতির বিপরীতমুখী ও সমানুপাতী অর্থাৎ $-c\theta$; আলম্বন-অক্ষ সাপেক্ষে বেলনের জাড্য-ভ্রামক (moment of inertia) I হ'লে, বেলনের কৌণিক গতির অবকল সমীকরণ হবে

$$I\ddot{\theta} = -c\theta \quad \text{বা} \quad T = 2\pi\sqrt{I/c} \qquad (১\text{-}১১.৪)$$

এখানে c একক কৌণিক চ্যুতি ঘটাতে প্রয়োজনীয় দ্বন্দ্বের মান। **এই সরল দোলন কৌণিক।**

ব্যাবর্তক বেলনের ভর M এবং ব্যাসার্ধ R হলে এক্ষেত্রে তার $I = \frac{1}{2}MR^2$; চাকতির জাড্য-ভ্রামকের মানও তাই ; তারের দৈর্ঘ্য l, ব্যাসার্ধ r এবং উপাদানের কৃন্তন-গুণাংক μ হলে $c = \mu\pi r^4/l$; সুতরাং

$$I/c = \frac{\frac{1}{2}MR^2}{\mu\pi r^4/l}; \ \therefore \ T = 2\pi\sqrt{\frac{\frac{1}{2}MR^2 l}{\mu\pi r^4}} = 2\pi\frac{R}{r^2}\sqrt{\frac{Ml}{2\pi\mu}}$$

এখানে কৃন্তন-গুণাংক প্রত্যানয়ক।

(৪) **ঘনকুণ্ডলিত স্প্রিং**—স্প্রিং-এর পাকগুলি খুব ঘন সন্নিবিষ্ট হলে প্রায় সমান্তরাল হয় (1.1 চিত্র)। তার প্রান্তীয় m ভরটিকে টেনে নিচে নামিয়ে ছেড়ে দিলে সে ওঠানামা ক'রতে থাকে ; স্প্রিং পর্যায়ক্রমে লম্বায় ছোটবড় হতে থাকবে আর সঙ্গে সঙ্গে পাকগুলি মোচড় খেতে থাকবে আর খুলতে থাকবে। এই স্পন্দনে **রৈখিক আর ব্যাবর্ত** দুরকম দোলনেরই সহাবস্থান ঘটে।

তারের ব্যাসার্ধ r, পাকের ব্যাসার্ধ R, পাকের সংখ্যা N এবং তারের উপাদানের কৃন্তন-গুণাংক μ হলে দেখানো যায় যে* **অনুদৈর্ঘ্য দোলনের** জন্য

* পদার্থের ধর্ম—দেবীপ্রসাদ রায়চৌধুরী (২য় সংস্করণ) পৃঃ ৬৩৪

$$m\ddot{y} = -\frac{Nr^4}{4\mu R^3}y \quad \text{বা} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m.4\mu R}{Nr^4}}$$

$$= \frac{4\pi R}{r^2}\sqrt{\frac{m\mu R}{N}} \qquad (১\text{-}১১.৫)$$

স্প্রিং-এর ভর m' ধরলে আগের মতোই কার্যকরী ভর $(m+m'/3)$ হবে। প্রত্যানয়ক এক্ষেত্রে কৃন্তন-গুণাংক।

আবার m ভরের বদলে স্প্রিং-এ অনুভূমিক একটা রড লাগিয়ে তাতে মোচড় দিয়ে ছেড়ে দিলে স্প্রিং-এর শুধু **ব্যাবর্ত দোলন** হবে। তখন লম্বন-অক্ষ সাপেক্ষে অনুভূমিক রডের জাড্য-ভ্রামক I, স্প্রিং-এর লম্বদৈর্ঘ্য l, তার ভর m' এবং তারের উপাদানের ইয়ং-গুণাংক q হলে*

$$T = \frac{4\pi}{r^2}\sqrt{\frac{(I+m'R^2/3)l}{\pi q}} \qquad (১\text{-}১১.৬)$$

প্রশ্ন—হালকা এক স্প্রিং-এ 15 পাউণ্ড ভর ঝোলালে সে দৈর্ঘ্যে 8 ইঞ্চি বাড়ে। তাকে আরও 4 ইঞ্চি টেনে ছেড়ে দিলে পর্যায়কাল এবং ভরে সঞ্চিত শক্তি কত কত? [উঃ 0.91 সে, 5/4 ফুঃপাঃ]

(৫) **ক্যান্টিলেভার**—লম্বা হালকা এক ধাতুপাতকে অনুভূমিক রেখে, এক প্রান্ত দৃঢ়ভাবে আটকে মুক্তপ্রান্তে ভার চাপালে, সেই প্রান্ত ঝুলে পড়ে এবং তাতে সেই পাতের বংকন ঘটে। পাতের কয়েকটি স্তর লম্বায় বাড়ে আর কয়েকটি লম্বায় ছোট হয়ে যায় এবং এই বিকৃতির ফলে প্রত্যানয়ক পীড়ন বলের উৎপত্তি হয়। কাজেই মুক্তপ্রান্ত একটু নামিয়ে ছেড়ে দিলে সেই প্রান্ত ওঠানামা ক'রতে থাকে। এই ব্যবস্থাকে ক্যান্টিলেভার বলে।

ক্যান্টিলেভার পাতের দৈর্ঘ্য l, মুক্ত আয়তপ্রান্তের ক্ষেত্রফল A, বংকনের ফলে উদ্ভূত আবর্তন-ব্যাসার্ধ k, উপাদানের ইয়ং-গুণাংক q হলে এবং প্রান্তে m ভর চাপানো হয়ে থাকলে ক্যান্টিলেভারের স্পন্দনের অবকল সমীকরণ এবং পর্যায়কাল হয় যথাক্রমে **

$$m\ddot{y} = -\frac{3Aqk^2}{l^3}y \quad \text{এবং} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{ml^3}{3Aqk^2}}$$

$$= \frac{2\pi l}{k\sqrt{3}}\sqrt{\frac{ml}{qA}} \qquad (১\text{-}১১.৭)$$

* Properties of matter (Champion & Davy) 3rd edn. pp. 310. Ans. 9.

** একই বই পৃঃ ৭১

এখানেও প্রয়োজনবোধে পাতের ভরের জন্য শুদ্ধি প্রয়োগ করা যায়। পাতটিকে খাড়াভাবে রেখে তলার প্রান্ত আটকে, ওপরের মুক্তপ্রান্তে বিচলন ঘটিয়েও (13.6*a* চিত্র) স্পন্দনসৃষ্টি সম্ভব ; সুরশলাকার বাহুর স্পন্দন (13.9 চিত্র) তার উদাহরণ।

এদের ক্ষেত্রে **সরল দোলন অনুপ্রস্থ,** পথ বৃত্তচাপীয়। ইয়ং-গুণাংক এখানে প্রত্যানয়ক।

খ. অভিকর্ষজাত সরল দোলন : (১) পৃথিবীর ব্যাস বরাবর সুড়ঙ্গপথে ভরের যাতায়াত—ধরা যাক, পৃথিবীর কোন ব্যাস CD বরাবর সোজা মসৃণ একটি সুড়ঙ্গ কেটে তার মধ্যে (1.11 চিত্র) একটি ভর (m) ফেলে দেওয়া গেল। অভিকর্ষের ক্রিয়ায় সে কেন্দ্রের দিকে যাবে ; কেন্দ্রে (O) পৌঁছে সরল দোলকপিণ্ডের মতোই সেখানে থামবে না, গতি-জড়তার দরুন আরও এগিয়ে যাবে এবং আবার কেন্দ্রের দিকেই আকৃষ্ট হবে। ভরটি D বিন্দুতে পৌঁছে আবার এই অভিকর্ষীয় আকর্ষণে কেন্দ্রের দিকে ফিরে আসবে এবং সরল দোলকের মতোই সুড়ঙ্গ বরাবর যাতায়াত করতে থাকবে।

চিত্র 1.11—পৃথিবীর ব্যাস বরাবর সুড়ঙ্গপথে ভরের যাতায়াত

ধরা যাক, কোন-এক মুহূর্তে m ভরটি Q' বিন্দুতে উপস্থিত এবং $OQ'=x$; তাহলে তার ওপরে সক্রিয় কেন্দ্রাভিমুখী বল

$$F=G\,(\,m\times x \text{ ব্যাসার্ধের গোলকের ভর })/x^2$$

$$=G.m\times \tfrac{4}{3}\pi x^3\rho/x^2=(\tfrac{4}{3}Gm\rho)\,\pi x$$

এখানে পৃথিবীকে ρ সুষম ঘনত্বের গোলক ব'লে ধরা হয়েছে। দেখা যাচ্ছে এই বল সর্বদাই পৃথিবীর কেন্দ্র O-অভিমুখী এবং $OQ'\ (=x)$ সরণের সমানুপাতিক। সুতরাং জড়তা-বল

$$m\ddot{x}=-(\tfrac{4}{3}Gm\rho)\,\pi x \text{ অতএব } T=2\pi\sqrt{\frac{3}{4\rho G\pi}}=\sqrt{3\pi/\rho G}$$

(১-১১.৮)

যদি পৃথিবীপৃষ্ঠে অভিকর্ষজ ত্বরণ g আর পৃথিবীর ভর

$$M = (\tfrac{4}{3})\,\pi R^3 \rho \text{ ধরি, তবে ভরটির ওজন হয়}$$

$$mg = \frac{GmM}{R^2} \quad \text{এবং } g = \frac{GM}{R^2} = \tfrac{4}{3} G\pi\rho R \text{ এবং } \frac{R}{g} = \frac{3}{4\pi\rho G}$$

তাহলে ১-১১.৮ থেকে পাচ্ছি

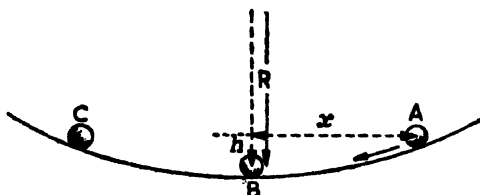
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{3}{4\pi\rho G}} = 2\pi \sqrt{R/g} \qquad (১\text{-}১১.৯)$$

অর্থাৎ পৃথিবীর ব্যাস বরাবর, m ভরের যাতায়াতের পর্যায়কাল ঐ ব্যাসার্ধের সমদৈর্ঘ্য সরল দোলকের পর্যায়কালের সমান। এখানে দোলন সরলরৈখিক।

প্রশ্ন—পৃথিবীর ব্যাস 12,800 মি এবং পৃথিবীপৃষ্ঠে অভিকর্ষীয় ত্বরণ 9.80 মি/সে^{2} ধরলে পৃথিবীর ব্যাস বরাবর কাটা সুড়ঙ্গপথে পৃথিবীর এক প্রান্ত থেকে অপর প্রান্তে (ভারত থেকে আমেরিকা) পৌঁছতে কত সময় লাগার কথা? [উঃ মাত্র 85 মিনিটের মতো]

স্বভাবতই কাজটা অসম্ভব, যদিও সম্ভব হলে প্রায় বিনা পরিশ্রমেই পৃথিবীর এপার-ওপার করা হয়ে যেত।

প্রসঙ্গক্রমে বলা যায় যে, m-এর এই গতিপথ পৃথিবীপৃষ্ঠের খুব কাছাকাছি আবর্তনশীল কৃত্রিম উপগ্রহের (S) বৃত্তপথে ভ্রমণের অভিক্ষেপ এবং m-এর পর্যায়কাল ও S-এর আবর্তনকাল সমান।

(২) অগভীর অবতল বরাবর গোলকের যাতায়াত (1.12 চিত্র) —একটি ছোট বলকে এইভাবে A বিন্দু থেকে গড়িয়ে নামতে দিলে অবতলের

চিত্র 1.12—অবতলে গোলকের যাতায়াত

নিম্নতম বিন্দু B সাপেক্ষে সে ABC পথে* আসা-যাওয়া করতে থাকবে। এই দোলন সরল দোলকপিণ্ডের গতির মতোই বৃত্তচাপীয়।

---

* চিত্রে এর কেন্দ্র দেখানো নেই; কেন্দ্র B থেকে অনেক ওপরে।

ধরা যাক, m ভরের এবং r ব্যাসার্ধের একটি ছোট গোলক A থেকে গড়িয়ে নেমে B পার হয়ে C বিন্দু পর্যন্ত উঠে যাচ্ছে, আবার নেমে আসছে। চলার যে-কোন মুহূর্তে বলটির কেন্দ্র, দীর্ঘ ব্যাসের $(2R)$ চাপ বরাবর চলছে। তার পরিধিস্থ যেকোন বিন্দুর, কেন্দ্র সাপেক্ষে আবর্তন হচ্ছে। তাহলে গতিশক্তি ও স্থিতিশক্তি সমীকৃত ক'রে পাব

$$\tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}I\omega^2 = \tfrac{1}{2}mv^2 + \tfrac{1}{2}m\omega^2 k^2 = mg\,(-h)$$

এখানে ω বলের ঘূর্ণন-বেগ, k আবর্তন (gyration) ব্যাসার্ধ, v বলটির কেন্দ্রের x-অক্ষ বরাবর (অনুভূমিক তলে AB দূরত্ব) রৈখিক বেগ, আর $(-h)$ খাড়া লাইন বরাবর AB তলভেদ। ধরা যাক, অবতল আর বল, দুয়ের কেন্দ্রের মধ্যে দূরত্ব R ; তাহলে স্ফেরোমিটার সূত্র থেকে

$$x^2 = h\,(2R-h) \simeq 2Rh \quad (\because \quad R \geqslant h)$$

তাহলে $\quad v^2 + k^2\omega^2 = -2gh = -2g\,x^2/2R$

বা $\quad v^2\,(1+k^2/r^2) = -(g/R)\,\dot{x}^2$

একে সময় t-র সাপেক্ষে অবকলন ক'রে পাব

$$(1+k^2/r^2)\,2v.\dot{v} = -(g/R)\,2x\dot{x}$$

বা $\quad (1+k^2/r^2)\,\dot{x}.\ddot{x} = -(g/R)\,x\dot{x}$

বা $\quad \ddot{x} = -\dfrac{g}{R\,(1+k^2/r^2)}x$

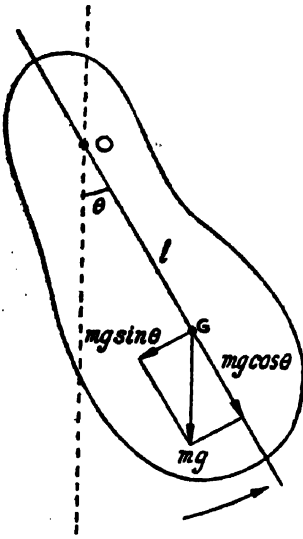
$$\therefore \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{R(1+k^2/r^2)}{g}} = 2\pi\sqrt{\tfrac{7}{5}.\frac{R}{g}} \quad (\text{১-১১.৯})$$

[কেননা গোলকের আবর্তন-ব্যাসার্ধের বর্গ $k^2 = \tfrac{2}{5}r^2$ হয়।] বাস্তবক্ষেত্রে ঘর্ষণের ফলে গোলকের গড়াগড়ি স্তিমিত হতে হতে থেমে যাবে। দোলন এখানে বৃত্তচাপীয়।

(৩) **দোলক**—দোলক দু'রকমের হতে পারে—সরল এবং যৌগিক। ১-৩ অনুচ্ছেদে সরল দোলনের উদাহরণ হিসাবে সরল দোলকের আলোচনা হয়েছে। সেখানে দেখা গেছে যে, দোলকের বিচলন অল্প হলে প্রত্যানয়ক বলের মান $(mg/l)\,x$ হয় ; সুতরাং তার পর্যায়কাল হবে

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\text{জড়তা-গুণাংক}}{\text{স্প্রিং-গুণাংক}}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{mg/l}} = 2\pi\sqrt{l/g}$$

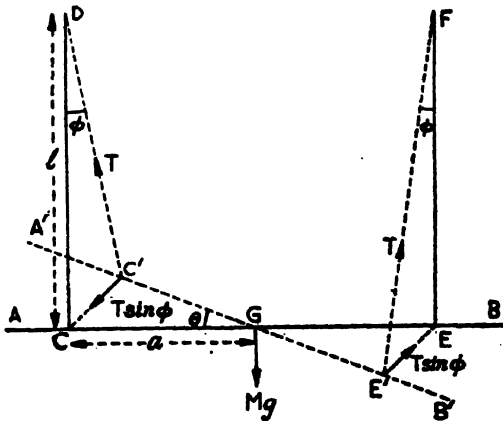
(১-১১.১০)

যেকোন কঠিন বস্তুই অনুভূমিক-অক্ষ সাপেক্ষে অল্প কোণ ক'রে দুললেই তাকে **যৌগিক দোলক** বলা যায়। সরল দোলকের মতোই স্থির অবস্থান থেকে যৌগিক দোলকের (চিত্র 1.13) θ স্বল্প কোণে বিচলিত অবস্থায় প্রত্যানয়ক বলের মান $mg\theta$ এবং দোলকের ভারকেন্দ্রে (G) এই বল ক্রিয়া করে। দোলনের অক্ষবিন্দু O থেকে G-র দূরত্ব l ধরলে প্রত্যানয়ক দ্বন্দ্বের ভ্রামক $mg\theta.l$ এবং সেই দোলন-অক্ষ সাপেক্ষে দোলকের জাড্য-ভ্রামক $I = mk^2$ হ'লে আবর্তন দ্বন্দ্ব হবে $I\ddot{\theta}$ (আবর্ত-জাড্য × কৌণিক ত্বরণ);

চিত্র 1.13—যৌগিক দোলক

সুতরাং $I\ddot{\theta} = mk^2\ddot{\theta} = mgl\theta$

$$\therefore\ T = 2\pi\sqrt{\frac{mk^2}{mgl}} = 2\pi k\sqrt{1/lg}$$

$$= 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgl}} \quad (১\text{-}১১.১১)$$

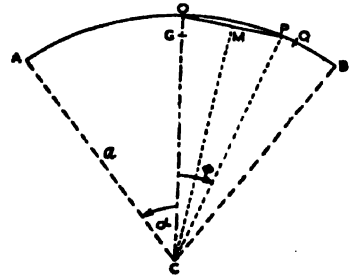
দণ্ড দোলক—একটি দীর্ঘ সুষম দণ্ডকে দুটি সমদৈর্ঘ্য ও সমান্তরাল সুতো দিয়ে ঝোলালে দ্বিসূত্র (bifilar) অনুভূমিক দণ্ড দোলক (চিত্র 1.14)

চিত্র 1.14—দ্বিসূত্র দোলক

হয়। তাকে একটু মোচড় (ϕ) দিয়ে ছেড়ে দিলে তার ব্যাবর্ত বা কৌণিক দোলন হয়। দোলনের অক্ষ, দণ্ডের ভারকেন্দ্র (G)-গামী খাড়া রেখা। দণ্ডের দৈর্ঘ্য $2a$ এবং বিলম্বন সূত্রের দৈর্ঘ্য l হলে

$$\text{প্রত্যানয়ক দ্বন্দ্ব} = T\sin\phi.2a \simeq T.\phi.2a = \tfrac{1}{2}mg.2a\phi$$
$$= mga.a\theta/l = (mga^2/l)\theta$$

কাজেই দণ্ডের কৌণিক দোলনের অবকল সমীকরণ $I\ddot{\theta} = \dfrac{-mga^2}{l}\cdot\theta$

$$\therefore \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga^2/l}} = \frac{2\pi}{a}\sqrt{\frac{Il}{mg}}$$
$$= \frac{2\pi}{a}\sqrt{\frac{ml^2}{12}\cdot\frac{l}{mg}} = \frac{\pi l}{a}\sqrt{\frac{l}{3g}} \qquad (১\text{-}১১.১২)$$

শীর্ষবিন্দু সাপেক্ষে বৃত্তচাপের দোলন—1.15(a) চিত্রে AOB এক সুষম বৃত্তচাপীয় ফলক। তার শীর্ষবিন্দু O, কেন্দ্রস্থ কোণ 2α, ব্যাসার্ধ a এবং μ ফলকটির রৈখিক ঘনত্ব; ধরা যাক, চাপটি স্বল্প কোণে দুলছে এবং অনুভূমিক দোলন-অক্ষ O-র মধ্য দিয়ে যাচ্ছে। তার মধ্যরেখা CO-র স্বল্পমাত্রা কৌণিক-বিচ্যুতি যদি θ হয়, আর $OG = h$ হয় তাহলে পাতটির দোলনের অবকল সমীকরণ হবে

চিত্র 1.15 (a)
দোলনী বৃত্তচাপ

$$I\ddot{\theta} = -mgh\theta = -2\alpha a\mu.gh\theta$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgh}} = 2\pi\sqrt{\frac{\quad}{gha\mu.2\alpha}}$$

এবারে আমরা জাড্য-ভ্রামক I এবং $OG(=h)$-র মান নির্ণয় ক'রব। প্রথম রাশিটি বার করতে চাপের ছোট্ট দৈর্ঘ্য $PQ = a.\delta\phi$ নেওয়া যাক ($\delta\phi = \angle PCQ$); এই অংশটুকুর ভর $a\delta\phi.\mu$ এবং শীর্ষবিন্দু O সাপেক্ষে জাড্য-ভ্রামক $mr^2 = \mu a\delta\phi.OP^2 = \mu a\,\delta\phi\,(2OM)^2$; সুতরাং গোটা চাপীয় ফলকটির O সাপেক্ষে জাড্য-ভ্রামক

$$I=2\int_0^{\alpha}\mu a\ OP^2.\delta\phi=2\int_0^{\alpha}\mu a\ (2a\sin\phi/2)^2\delta\phi$$

$$=8\int_0^{\alpha}\mu a^3\sin^2\tfrac{1}{2}\phi\ \delta\phi=4\mu a^3\int_0^{\alpha}(1-\cos\phi)\ \delta\phi$$

$$=4\mu a^3\ (\alpha-\sin\alpha)$$

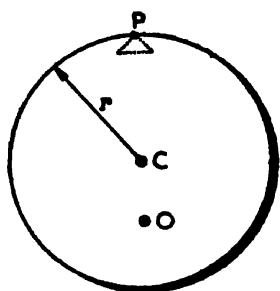
আবার $h=OG=OC-CG=a-a\dfrac{\sin\alpha}{\alpha}=a\dfrac{\alpha-\sin\alpha}{\alpha}$

এই দুই মান অবকল সমীকরণে বসালে পাচ্ছি

$$4\mu a^3\ (\alpha-\sin\alpha)\ \ddot{\theta}=-2\mu g a\alpha\ \ a\left[\frac{\alpha-\sin\alpha}{\alpha}\right]\theta$$

বা $\ddot{\theta}=-\dfrac{g}{2a}\theta$ বা $T=2\pi\sqrt{\dfrac{2a}{g}}$ (১-১১.১৩)

এই পর্যায়কাল চাপের ব্যাসের সমদৈর্ঘ্য সরল দোলকের পর্যায়কালের সমান।

প্রশ্ন—(১) একটি চাকতির পরিধিস্থ কোন বিন্দু [1.15(*b*) চিত্র] দিয়ে অনুভূমিক দোলন অক্ষ গেছে। সেটি যদি অভিকর্ষের ক্রিয়ায় দুলতে সুরু করে, তবে পর্যায়কাল কত হবে?

[উঃ $2\pi\sqrt{\frac{3}{2}r/g}$]

চিত্র 1.15 (*b*)—দোলনী চাকতি

(২) 4 ইঞ্চি ব্যাসার্ধের চক্রের পরিধিতে অনুভূমিক অক্ষ-সাপেক্ষে পর্যায়কাল 0.784 সে হলে অভিকর্ষীয় ত্বরণের মান কত?

(সংকেত—$T=2\pi\sqrt{I/mgr}$; $I=\frac{3}{2}Mr^2$) [উঃ 32.1 ফি/সে^{2}]

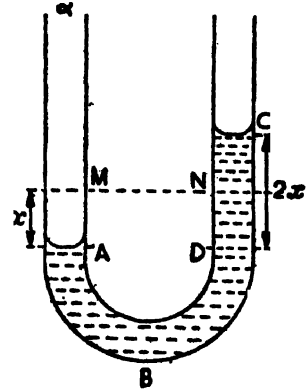
(৪) U-নলে তরলস্তম্ভের নর্তন—1.16(*a*) চিত্রে PQR একটি মোটা মসৃণ U নল। তাতে ρ ঘনত্বের এবং মোট l দৈর্ঘ্যের (MBN) তরল রাখা আছে। নলের প্রস্থচ্ছেদ α হলে তরলের ভর $l\alpha\rho$ দাঁড়ায়। এখন এক বাহুতে তরলতল চেপে x দূরত্ব নামিয়ে দিলে অপর বাহুতে ততখানিই

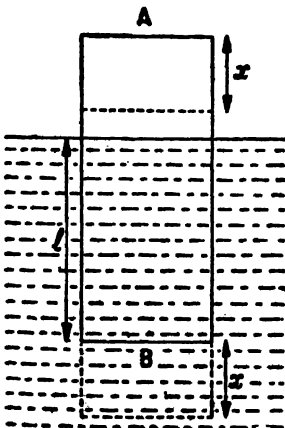
উঠবে এবং দুই বাহুতে তরলের মধ্যে তলভেদ (CD) দাঁড়াবে $2x$ এবং সেই দৈর্ঘ্যের তরলস্তম্ভের ভার $2x\alpha\rho g$ হবে। এখন তরল থেকে চাপ সরিয়ে নিলে দুই বাহুতেই তরল পর্যায়ক্রমে ওঠানামা করতে থাকবে—প্রত্যানয়ক বল $2x\alpha\rho g$; এই দোলনের অবকল সমীকরণ

$l\alpha\rho\ddot{x} = -2\alpha\rho g.x$ তাহলে

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l\alpha\rho}{2\alpha\rho g}} = 2\pi\sqrt{\tfrac{1}{2}l/g} \quad (১\text{-}১১.১৪)$$

চিত্র 1.16(a)—U-নলে তরলের দোলন

এখানে পর্যায়কাল তরলস্তম্ভের অর্ধ-দৈর্ঘ্যের সমান সরল দোলকের পর্যায়কালের সমান। দোলন এখানে সরলরৈখিক। কাচের নলে পারদ থাকলে স্পন্দন দীর্ঘস্থায়ী হয়। বাস্তবে সবক্ষেত্রেই তরল ও নলের মধ্যে ঘর্ষণের ফলে স্পন্দন স্তিমিত হয়ে যায়।

প্রশ্ন—একটি U-নলে 30 সেমি দীর্ঘ জলস্তম্ভের সরল দোলনের পর্যায়কাল কত ? ($g = 981$ সেমি/সে^{2}) [উঃ 1.098 সে]

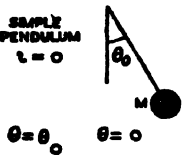
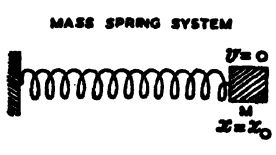
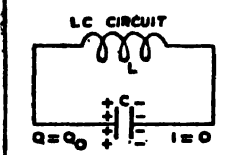
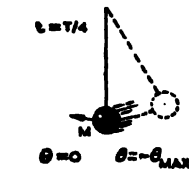
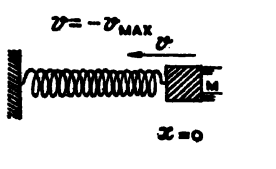
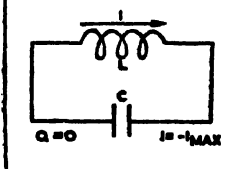
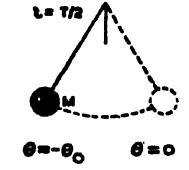
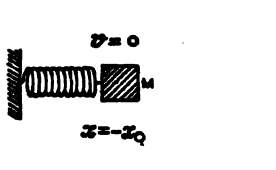
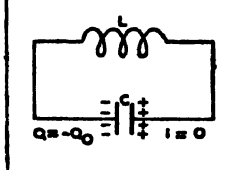
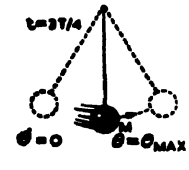
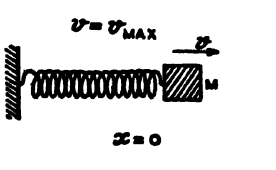
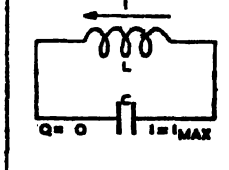
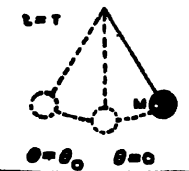
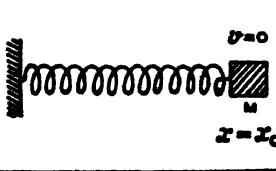
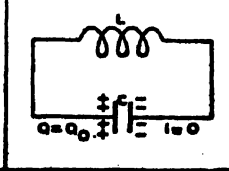
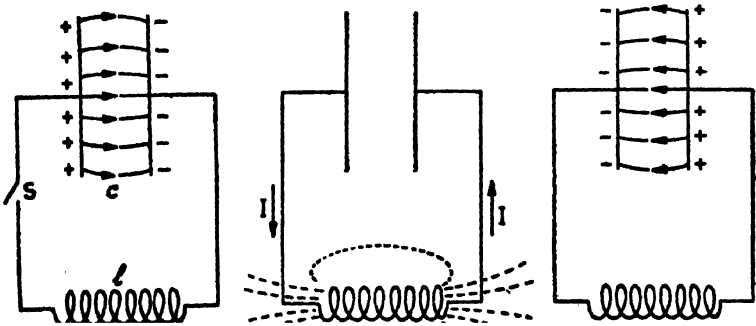
(গ) প্লবতা-জনিত দোলন—1.16(b) চিত্রে একটি বেলনের খাড়া l দৈর্ঘ্য ρ ঘনত্বের তরলের মধ্যে ডুবে আছে ; তার প্রস্থচ্ছেদ α হলে অপসারিত তরলের ভার $l\alpha\rho g$ এবং আর্কিমিদিসের সূত্র অনুযায়ী তা-ই বেলনের ওজন। এখন বেলনটিকে চেপে আরও x-দৈর্ঘ্য ডুবিয়ে দিলে আরও $\alpha x\rho g$ ওজনের তরলের অপসারণ হবে এবং সেই প্লবতা-বল বেলনটিকে ওপরে ঠেলবে। প্লবতা-বল বাড়তি-নিমজ্জন দৈর্ঘ্য x-এর সমানুপাতিক হওয়ায় বেলনটি খাড়া রেখা বরাবর নাচতে থাকবে। সুতরাং

চিত্র 1.16 (b)—প্লবতাস্পৃষ্ট দোলন

$$l\alpha\rho.\ddot{x} = \alpha\rho g(-x)$$

$$\text{বা} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{l\alpha\rho}{\alpha\rho g}} = 2\pi\sqrt{l/g} \qquad (১\text{-}১১.১৫)$$

এই রৈখিক স্পন্দনের দোলনকাল বেলনের নিমজ্জিত অংশের সমদৈর্ঘ্য সরল দোলকের পর্যায়কালের সমান। স্বভাবতই তরলের সঙ্গে ঘর্ষণের ফলে বেলনের স্পন্দন ধীরে ধীরে থেমে যায়। জলে বা তরলে ভাসন্ত যেকোনো কঠিন বস্তুর নাচনই ১-১১.১৫ সমীকরণ-শাসিত—তার আকার যেরকমই হোক না কেন।

প্রশ্ন—সমুদ্রজলে ভাসমান জাহাজের স্পন্দনকাল কত ?

(ঘ) বৈদ্যুতিক ও চৌম্বক দোলন : (১) দোলনী বিদ্যুৎক্ষরণ—কোন আবেশকের মধ্য দিয়ে আহিত ধারক থেকে বিদ্যুৎক্ষরণ হতে দিলে, যদি আবেশকের রোধ নগণ্য হয় তাহলে ধারকের এক পাত থেকে অন্য পাতে বৈদ্যুতিক আধান, U-নলে তরলের মত, যাতায়াত করতে থাকে—দোলন অবশ্যই অদৃশ্য।

1.17 চিত্রের প্রথমে পূর্ণ আহিত একটি সমান্তরালপাত ধারকের দুই পাত একটি খোলা সুইচ এবং রোধহীন আবেশকের সাহায্যে যুক্ত দেখান হয়েছে।

চিত্র 1.17—দোলনী বিদ্যুৎক্ষরণ

দুই পাতের মধ্যবর্তী অঞ্চলে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। সুইচ টিপে দিলে এক পাত থেকে পজিটিভ আধান অন্য পাতে যেতে থাকবে এবং আবেশকের আশেপাশে চৌম্বকক্ষেত্র প্রতিষ্ঠা করবে। যখন দুই পাত সমবিভব, তখন ধারকের মধ্যে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র নেই, সব শক্তিটুকুই আবেশকের আশেপাশে চৌম্বক ক্ষেত্রে সঞ্চিত রয়েছে (চিত্রে দ্বিতীয় ছবি)। এবারে

পজিটিভ আধানের পরিমাণ দ্বিতীয় পাতে বাড়তে থাকবে, সঙ্গে সঙ্গে তার বিভবও। দুই পাতের মধ্যে বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের মুখ এবারে বিপরীত দিকে হবে। বিভবভেদ পূর্বের সমান হলে বিদ্যুৎপ্রবাহ বন্ধ হবে, চৌম্বকক্ষেত্র আর থাকবে না, সমস্ত শক্তিটুকু বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে জমা হবে। এবার U-নলে তরলের মত আধান তথা প্রবাহ, উল্টোমুখে চলতে সুরু করবে এবং বিদ্যুৎক্ষেত্র থেকে শক্তি চৌম্বকক্ষেত্রে যেতে থাকবে। এইভাবে পর্যায়ক্রমে আবেশকের মধ্যে দিয়ে বিদ্যুৎ-আধান চলাচল করবে এবং বৈদ্যুতিক (স্থিতি) শক্তি থেকে চৌম্বক (গতি) শক্তির মধ্যে প্রত্যাবর্তী রূপান্তর ঘটতে থাকবে।

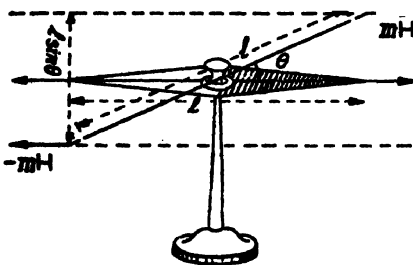
চিত্র 1.18—দোলক, স্প্রিং, ধারক-আবেশক সংস্থায় সরল দোলনের তুলনা

ধারকে মোট আধানের পরিমাণ Q এবং ধারকত্ব C হলে, দুই পাতের মধ্যে বিভব-ভেদ Q/C হবে। তখন বর্তনীতে প্রবাহ চলবে এবং আবেশ কুণ্ডলীতে $(-Ldi/dt)$ পরিমাণ আবিষ্ট e.m.f. তাকে বাধা দেবে ; সুতরাং যেকোন নিমেষে বর্তনীতে

$$\frac{Q}{C} = -L\frac{di}{dt} = -L\frac{d}{dt}\left(\frac{dQ}{dt}\right) = -L\ddot{Q}$$

তাহলে বিদ্যুৎমোক্ষণের পর্যায়কাল দাঁড়াবে $T = 2\pi\sqrt{LC}$ (১-১১.১৬)
বেতার প্রেরক ও গ্রাহকযন্ত্রে এই সমীকরণ গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা নেয়।

1.18 চিত্রে সরল দোলকের অভিকর্ষজাত বৃত্তচাপীয় অনুপ্রস্থ দোলন, ভারাক্রান্ত স্প্রিং-এর স্থিতিস্থাপকতাজনিত রৈখিক অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন আর ধারক-আবেশক বর্তনীতে বিভবভেদ চালিত অদৃশ্য বৈদ্যুতিক আধানের সদিশ্ দোলনের তুলনামূলক প্রতিকৃতি দেখান হয়েছে। দোলনগুলি সদৃশ।

(২) **ভূচৌম্বক ক্ষেত্রে চুম্বকশলাকার দোলন**—স্থির চুম্বকশলাকা ভূচুম্বকীয় মধ্যতলে থাকে, কেননা তার অক্ষ বরাবর একই রেখায় দুই মেরুতে সমান ও বিপরীতমুখী বল ক্রিয়া করে। সেই তল থেকে তাকে θ কোণে বিচ্যুত করলে (1.19 চিত্র) প্রত্যানয়ক দ্বন্দ্বের উৎপত্তি হয় ; শলাকার চৌম্বকভ্রামক M এবং ভূচৌম্বক ক্ষেত্রের অনুভূমিক উপাংশ H হলে এই দ্বন্দ্বের মান $mH.\ l\sin\theta = MH\sin\theta$

চিত্র 1.19—দোলনী চুম্বক

হয় ; বিচ্যুতি অল্প হলে এই মান $(MH\theta)$ কৌণিক বিচ্যুতির (θ) আনুপাতিক। কাজেই বিচ্যুত শলাকাকে ছেড়ে দিলে তার **সরল কৌণিক দোলন** হতে থাকবে। তখন দোলনের সমীকরণ

$$I\ddot{\theta} = MH\sin\theta \simeq MH\theta$$

সুতরাং $T = 2\pi\sqrt{I/MH}$ (১-১১.১৭)

সাধারণ আলোচনা—এতক্ষণ নানা প্রত্যানয়ক বল বা বলসমাবেশের নিয়ন্ত্রণে নানা সংস্থার নানা পথে সরল দোলগতি আলোচিত হল। সব

সংস্থারই কিন্তু একটি সাধারণ ধর্ম চোখে পড়ে—তাদের স্পন্দনে একটিমাত্র স্বাতন্ত্র্যসংখ্যা (degree of freedom) রয়েছে যে তারা একটি মাত্র সরল বা বক্র রেখাংশ ধ'রে চলে। যখনই কোন সংস্থার গতীয় অবস্থা একটিমাত্র রাশি দিয়ে নির্দিষ্ট করা যায় তখনই বলা হয় তার স্বাতন্ত্র্যসংখ্যা এক। প্রতিটি উদাহরণেই রৈখিক সরণ x বা y, কিংবা নির্দিষ্ট কৌণিক বিচ্যুতি (θ) এই একটিমাত্র চলরাশি, সংস্থার গতির রূপরেখা নিয়ন্ত্রণ করছে। একক স্বাতন্ত্র্যসংখ্যার তন্ত্রে গতি ও স্থিতিশক্তির যোগফল অপরিবর্তনেয় রাশি। তাহলে আমরা লিখতে পারি

$$K+V=\text{ধ্রুবক} \quad \text{অর্থাৎ} \quad \tfrac{1}{2}mv^2+\tfrac{1}{2}m\omega^2x^2=\alpha v^2+\beta x^2=\text{ধ্রুবক}$$

অবকলন করে পাই $\alpha v\dot{v}+\beta x\dot{x}=0$

অর্থাৎ $\alpha \dot{x}\ddot{x}+\beta x\dot{x}=0$ বা $\ddot{x}+(\beta/\alpha)\,x=0$

$$\text{তাহলে } T=2\pi\sqrt{\alpha/\beta}=2\pi\sqrt{\frac{\text{একক বেগে গতিশক্তি}}{\text{একক সরণে গতিশক্তি}}}$$

(১-১১.১৮)

কিন্তু মাত্রক (dimension) বিচারে সমীকরণটি অশুদ্ধ, কারণ ডানদিকের রাশিটি এক বিশুদ্ধ সংখ্যা মাত্র, কিন্তু বাঁদিকের রাশির একক ($\sec^{-1}$) রয়েছে। তাই শুদ্ধ করে বলতে হয়

$$T=2\pi\sqrt{\frac{\text{গতিশক্তি}/(\text{ বেগ })^2}{\text{স্থিতিশক্তি}/(\text{ সরণ })^2}} \qquad (\text{ ১-১১.১৯ })$$

কেননা তখন দু'তরফের মাত্রক মেলে।

আলোচিত উদাহরণগুলি বাস্তবে অলভ্য। কারণ প্রতি দোলনেই পারিপার্শ্বিক অল্পবিস্তর বাধা দেয়। তাতে দোলন স্তিমিত হতে হতে থেমে যায়। সেইরকম দোলনকে মন্দিত, অবদমিত বা স্বভাবী দোলন বলে। পরের অধ্যায়ে তারা আলোচ্য বিষয়।

প্রশ্নমালা

১। সরল দোলনরত কণার t_1 এবং t_2 নিমেষে সরণ x_1 ও x_2 এবং বেগ u_1 ও u_2 হলে তার সরণবিস্তার, বেগবিস্তার ও পর্যায়কাল কত?

[উঃ $a^2=\dfrac{u_1^2x_1^2-u_2^2x_2^2}{u_1^2-u_2^2}$; $v_m^2=\dfrac{u_1^2x_1^2-u_2^2x_2^2}{x_2^2-x_1^2}$

$T=4\pi^2\dfrac{u_2^2-u_1^2}{x_1^2-x_2}$]

২। এক সরলরেখা বরাবর সরল দোলনরত কণার ত্বরণবিস্তার $5\pi^2$ সেমি/সে^{2} আর 4 সেমি সরণে বেগ 3π সেমি/সে। দেখাও যে তার পর্যায়কাল সেকেণ্ড দোলকের সমান।

৩। দশ গ্রাম ভরের একটি সরল দোলককে 50π সেমি/সে বেগযোগে মধ্যক অবস্থান থেকে সরিয়ে এক সেকেণ্ড পরে নিমেষের জন্য থামান হল। তার গতীয় সমীকরণ লেখ। চরম সরণে দোলকের ওপর সক্রিয় প্রত্যানয়ক বল এবং সেখানে স্থিতিশক্তি কত কত ?

[উঃ $x=100 \sin \pi t/2$; $250\pi^2$ ডাইন ; $12500\pi^2$ আর্গ]

৪। HCl অণুতে হাইড্রোজেন ও ক্লোরিণ পরমাণুর মধ্যে ব্যবধান বদলাতে 0.54×10^6 ডাইন/সেমি বল লাগে। H পরমাণুর ভর 1.66×10^{-24} গ্রাম এবং সে সাপেক্ষে ক্লোরিণ অণুর ভর অসীম ধরলে আণবিক স্পন্দনের মূল কম্পাংক কত ? [9.1×10^{13}/সে]

৫। শংকু দোলকের পর্যায়কাল কত ? [উঃ $2\pi\sqrt{l\cos\theta/g}$]

৬। 6 গ্রাম ভরের এবং 2 সেমি ব্যাসের একটি পরীক্ষানলে জলের নর্তনকাল কত ? [উঃ 0.45 সে]

৭। নগণ্য ভরের এবং l দৈর্ঘ্যের একটি তারকে দুদিক থেকে T টান দিয়ে সটান অবস্থায় রাখা আছে। তার মধ্যবিন্দুতে m একটি বিন্দু-ভর। তাকে একটু টেনে নামিয়ে ছেড়ে দিলে স্পন্দনকাল কত হবে ? [উঃ $\pi\sqrt{ml/T}$]

৮। $2a$ দৈর্ঘ্যের একটি সুষম রড খাড়াভাবে দুললে তার স্পন্দনকাল কত ? [উঃ $4\pi\sqrt{a/3g}$]

৯। একটি সাধারণ হাইড্রোমিটারের 1.00 এবং 0.80 আপেক্ষিক গুরুত্ব নির্দেশক দুটি দাগের মধ্যে দূরত্ব 4 সেমি। জলে তার নর্তনকাল কত ? ($g=9.8$ মি/সে^{2}) [উঃ 0.8 সে]

১০। নিম্নপ্রান্তে আবদ্ধ একটি খাড়া স্প্রিং-এর মাথায় 6 পাউণ্ড ওজন চাপালে তার দৈর্ঘ্য 3 ইঞ্চি কমে যায়। সেই অবস্থায় সেই ওজন হঠাৎ এক পাউণ্ড কমালে শীর্ষবিন্দুর যে সরল দোলন হবে তা দেখাও। সেই দোলনকাল কত ? [উঃ 0.5 সে]

১১। 300 পাউণ্ড ওজনের শংকু আকৃতির একটি বয়া সমুদ্রজলে শীর্ষবিন্দু

নীচে রেখে ভাসছে। তার লম্বদৈর্ঘ্য 4 ফুট, ভূমিব্যাস 3 ফুট এবং জলের ঘনত্ব 64 পাউণ্ড/ঘনফুট হলে বয়াটির নর্তনকাল কত ? [উঃ 1.65 সে]

১২। দশ সেমি ব্যাসের ও আধ সেমি বেধের অ্যালুমিনিয়ামের চাকতি 25 সেমি দীর্ঘ দুই সুতো দিয়ে ঝোলানো হলে খাড়া অক্ষ সাপেক্ষে তার স্বল্প-বিস্তার দোলনকাল কত ? ($\rho=2.72$ g/cc) [উঃ 2.05 সে]

১৩। অনুভূমিক এক পাতলা ছদের ওপর হাল্‌কাভাবে বালুকণা ছড়ান। সেটি সেকেণ্ডে শতবার ওঠানামা করছে। কত স্পন্দনবিস্তারে বালুকণা ছিটকে পড়বে ?

১৪। কোন কণার F_1 বলের ক্রিয়ায় পর্যায়কাল T_1 এবং F_2 বলের ক্রিয়ায় T_2 হলে দুই বলের সম্মিলিত ক্রিয়ায় কত পর্যায়কাল হবে ?
[উঃ $T_1T_2/\sqrt{T_1^2+T_2^2}$]

১৫। স্থিরবৈদ্যুত আকর্ষণী বল $F_1=-\alpha/x^2$ এবং বিকর্ষণী বল $F_2=\beta/x^{10}$ এই দুয়ের মিলিত ক্রিয়ায় একটি কণা সরলরেখায় চলতে পারে। স্থিরবিন্দু থেকে সামান্য (x_0) সরিয়ে ছেড়ে দিলে তার দোলনকাল কত হবে ? [উঃ $2\pi\sqrt{mx_0^3/8\alpha}$]

পরিশিষ্ট

১-১২. জটিল রাশি (Complex Numbers) :

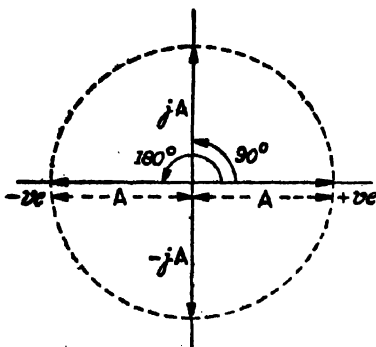
সরল দোলন ছাড়াও নানা রকমের স্পন্দন হয়। তাদের অবকল সমীকরণ সমাধানে নানা রকমের জটিলতাও বেশী। সব শ্রেণীর পর্যাবৃত্ত গতির আলোচনায় জটিল রাশির জ্ঞান থাকলে বিশেষ সুবিধা হয়। সাইন বা কোসাইন রাশিকে জটিল রাশির আকারে ফেলে সংক্ষেপে লেখা যায় ; জটিল রাশিকে আবার সূচক (exponential) বা সদিশ্‌ (vector) রাশির আকারে প্রকাশ করার সুবিধাও যথেষ্ট। তাই আমরা এগুলি আলোচনা ক'রব।

গণিতের সব রাশিকেই বাস্তব (real) এবং অলীক (imaginary) এই দুই শ্রেণীতে ফেলা যায়। যাদের বর্গমূল ধনাত্মক তারা বাস্তব। ধনাত্মক, ঋণাত্মক, খণ্ড, অখণ্ড সব বাস্তব রাশিকেই ঠিক সেই রাশিটি দিয়ে গুণ করলে ধনাত্মক রাশিই মেলে। কিন্তু কোন ঋণাত্মক রাশির বর্গমূল হয় না, তাই সেরকম রাশির বর্গমূল অলীক রাশি। কোন বাস্তব ঋণাত্মক রাশি $-q^2$ কে

$q^2 \times(-1)$ আকারে লেখা যায়। তখন $-q^2$ বাস্তব, তার বর্গমূল $\pm q \times(\sqrt{-1})$; $\sqrt{-1}$ রাশিকে বিশুদ্ধ অলীক রাশি বলে এবং তাকে j-অক্ষর দিয়ে চিহ্নিত করা হয়। তাহলে

$$\sqrt{-q^2}= \pm q \sqrt{-1}= \pm jq$$

অলীক রাশির জ্যামিতিক ব্যাখ্যা—কার্যক্ষেত্রে অলীক রাশি মোটেও কাল্পনিক নয়, তার বাস্তবতা জ্যামিতিক দৃষ্টিকোণ থেকে উপস্থাপিত করা যেতে পারে। ধনাত্মক বাস্তব রাশি, যথা, p, q, 5, 9 প্রভৃতিকে কার্তেজীয় নির্দেশ-তন্ত্রে ধনাত্মক x-অক্ষ বরাবর ফেলা হয় ; তেমনিই ঋণাত্মক বাস্তব রাশিকে তার সমানুপাতিক দৈর্ঘ্যের সরলরেখা দিয়ে ঋণাত্মক x-অক্ষ বরাবর নির্দিষ্ট করা হয়।

এখন A রাশিকে ধনাত্মক x-অক্ষ বরাবর ফেলা হোক (চিত্র 1.20) ; তাকে -1 দিয়ে গুণ করলে $-A$ পাই, তাকে নির্দিষ্ট করতে মূলবিন্দুর বিপরীত দিকে সমদৈর্ঘ্যের রেখা টানা হয় ; অর্থাৎ A-কে -1 দিয়ে গুণ করলে তাকে π রেডিয়ান বা 180° ঘুরিয়ে দেওয়া হচ্ছে। এখন $j^2=-1$; সুতরাং $j^2 \times A$ মানে A-কে 180° ঘুরিয়ে দেওয়া হচ্ছে—A, বামাবর্তে দুই সমকোণে ঘুরে যাচ্ছে। আমরা তাহলে মনে করতে পারি যে j দিয়ে পরপর দুবার গুণ করলে যদি কোন রাশির π বা 180° বামাবর্তী ঘূর্ণন হয়, তাহলে j এমন একটি কারক (operator) যা দিয়ে কোন রাশিকে গুণ করলে সে বামাবর্তে $\pi/2$ অর্থাৎ 90° ঘোরে। স্থানাংক জ্যামিতির প্রথানুসারে আমরা বামাবর্তে এক সমকোণে ঘূর্ণনকে $+j$ এবং দক্ষিণাবর্তী সমমান ঘূর্ণনকে $-j$ দিয়ে গুণ করার সামিল ধরে নেব। R যদি কোন রাশির মাত্রা হয় তাহলে $\pm jR$ তার সমকোণে সমান দুই রাশি বোঝাবে।

চিত্র 1.20—অলীক রাশির জ্যামিতিক ব্যাখ্যা

জটিল রাশির জ্যামিতিক রূপ—বাস্তব এবং অলীক রাশির সমন্বয়েই জটিল রাশির উৎপত্তি। p এবং q যেকোন বাস্তব রাশি (ধনাত্মক বা ঋণাত্মক) হলে $p \pm jq$ রাশিকে জটিল রাশি বলে—p তার বাস্তব আর

jq তার অলীক অংশ। যেকোন জটিল রাশির অলীক অংশ শূন্য হলে সে বিশুদ্ধ বাস্তব, আর বাস্তব অংশ শূন্য হলে সে বিশুদ্ধ অলীক রাশি।

দেখা যায়, তিন শ্রেণীর রাশির পরস্পর নিরপেক্ষ দুটি ক'রে অংশ আছে—

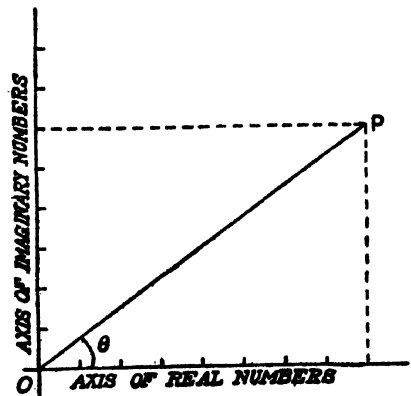
(ক) **জটিল রাশি**—বাস্তব এবং অলীক অংশ ;

(খ) **ভেক্টর বা সদিশ্ রাশি**—মাত্রা এবং দিক্ বা অভিমুখ ;

(গ) **সরলরেখা**—দৈর্ঘ্য এবং কোন অক্ষসাপেক্ষে নতিকোণ (θ)।

সুতরাং সরলরেখা দিয়ে জটিল ও সদিশ্ দুই শ্রেণীর রাশিকেই প্রকাশ করা যায়। সরলরেখা দিয়ে জটিল রাশিকে দুভাবে রূপায়িত করা যায়—Argand চিত্র আর ধ্রুবীয় (polar) স্থানাংকনির্দেশ তন্ত্র।

(ক) **আর্গান্দ্ চিত্র** (১.২১ চিত্র): যদি সমতলীয় কার্তেসিয় নির্দেশ-তন্ত্রে x-অক্ষ বরাবর জটিল রাশির বাস্তব আর y-অক্ষ বরাবর অলীক রাশি বসান যায় তাহলে (ক) ঐ তলকে জটিল তল বলে, (খ) ঐ তলের কোন বিন্দু Pর অবস্থান এক জটিল রাশি নির্দেশ করে, (গ) ঐ তলে OP রেখা সেই রাশির মান নির্দেশ করে।

উদাহরণ হিসাবে ধরা যাক, $z=4+3j$ রাশিকে জ্যামিতিকভাবে চিত্রিত করতে হবে। x-অক্ষ বরাবর 4 এবং y-অক্ষ বরাবর 3 একক নিলে $P(4, 3)$ বিন্দুর স্থানাংক পাব। মূলবিন্দু থেকে ($OP=5$ একক) রেখা টানলে তার দৈর্ঘ্য জটিল রাশি zএর সমান। যেকোন জটিল রাশি $z\equiv x+jy$ রাশিকে এইভাবে চিহ্নিত করা হয়। 1.21 চিত্রকে Argand diagram বলে।

চিত্র 1.21—আর্গান্দ্ চিত্র

(খ) **ধ্রুবীয় স্থানাংকনির্দেশ তন্ত্র**: কোন বিন্দু Pর অবস্থান (x, y) স্থানাংক নিয়ে নির্দিষ্ট না করে মূলবিন্দুযোজক সরলরেখা OPর দৈর্ঘ্য R এবং x অক্ষের সঙ্গে OPর নতিকোণ θ দিয়েও নির্দেশ করা যায় ; এই নির্দেশতন্ত্রকে ধ্রুবীয়

তন্ত্র বলে। সেখানে মাত্রা (modulus) $R=(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}$ এবং কোণ $\theta=\tan^{-1}(y/x)$;

$$\therefore \quad |x+jy|=R=\sqrt{x^2+y^2}\ ;\ \angle\theta=R\angle\theta \qquad (১\text{-}১২.১)$$

এইভাবে চিহ্নিত করাই প্রথা। x-অক্ষ বরাবর মাত্রার উপাংশ $R\cos\theta$ এবং y-অক্ষ বরাবর তার উপাংশ $R\sin\theta$ যথাক্রমে জটিল রাশির বাস্তব এবং অলীক অংশ।

জটিল রাশির মৌলিক ধর্ম—(ক) কোন জটিল রাশি $z=x+jy$কে শূন্য হতে হলে তার বাস্তব (x) এবং অলীক (y) দুই অংশকেই আলাদা আলাদা ভাবে শূন্য হতে হবে। (খ) দুই জটিল রাশি z_1 এবং z_2এর দুই বাস্তব অংশ (x_1, x_2) আর দুই অলীক অংশ (y_1, y_2) পরস্পর আলাদা আলাদা ভাবে সমান হলে জটিল রাশি দুটি সমান হবে। (গ) জটিল রাশির যোগ, বিয়োগ, গুণ, ভাগ সাধারণ (scalar) বীজগণিতের সূত্রগুলি মেনে চলে (সদিশ রাশির ক্ষেত্রে সব সময় তা কিন্তু হয় না) অর্থাৎ

$$z_1\pm z_2=(x_1+jy_1)\pm(x_2+jy_2)=(x_1\pm x_2)+j(y_1\pm y_2)$$
$$=X+jY \qquad (১\text{-}১২.২)$$

$$z_1z_2=(x_1+jy_1)(x_2+jy_2)=(x_1x_2-y_1y_2)$$
$$+j(x_1y_2+x_2y_1)=X_1+jY_1 \qquad (১\text{-}১২.৩)$$

$$z_1/z_2=\frac{x_1+jy_1}{x_2+jy_2}=\frac{(x_1+jy_1)(x_2-jy_2)}{(x_2+jy_2)(x_2-jy_2)}$$
$$=\frac{(x_1x_2+y_1y_2)-j(x_1y_2-x_2y_1)}{x_2^2+y_2^2}$$
$$=\frac{x_1x_2+y_1y_2}{x_2^2+y_2^2}-j\,\frac{x_1y_2-x_2y_1}{x_2^2+y_2^2}$$
$$=X_2+jY_2 \qquad (১\text{-}১২.৪)$$

অর্থাৎ যোগ, বিয়োগ, গুণ ও ভাগের ফলে জটিল রাশিগুলি জটিলই থেকে যাবে।

কোন দুই জটিল রাশির যদি শুধু অলীক রাশির চিহ্নটুকু আলাদা হয় অর্থাৎ, $z=x+jy$ আর $z'=x-jy$ হয়, তাহলে তাদের **অনুবন্ধী** (conjugate) রাশি বলে। সেক্ষেত্রে

$$z+z'=2x\ ;\ z-z'=2jy\ ;\ zz'=x^2+y^2$$

আর $z/z' = \frac{x+jy}{x-jy} = \frac{(x+jy)^2}{x^2+y^2} = \frac{x^2-y^2}{x^2+y^2} + j\ \frac{2xy}{x^2+y^2}$ (১-১২.৫)

অর্থাৎ দুই অনুবর্তী জটিল রাশির যোগ এবং গুণফল বাস্তব রাশি, বিয়োগফল অলীক রাশি আর ভাগফল জটিল রাশি হবে।

জটিল রাশির ত্রিকোণমিতিক এবং সূচক রূপ : জটিল রাশির প্রকাশ করার দুই জ্যামিতিক পন্থাকে যুক্ত করলে আমরা রাশির ত্রিকোণমিতিক রূপ পাই—

$$z = x \pm jy = R\cos\theta \pm Rj\sin\theta = R(\cos\theta \pm j\sin\theta) \quad (১\text{-}১২.৬)$$

সুতরাং দুই বা ততোধিক রাশির যোগ বা বিয়োগফল প্রকাশে আমরা লিখতে পারি

$$\begin{aligned} z_1 \pm z_2 \pm z_3 \pm \cdots &= (x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm \cdots) \\ &\qquad + j(y_1 \pm y_2 \pm y_3 \pm \cdots) \\ &= R(\cos\theta_1 \pm \cos\theta_2 \pm \cos\theta_3 \pm \cdots) + jR(\sin\theta_1 \pm \sin\theta_2 \\ &\qquad \pm \sin\theta_3 \pm \cdots) \end{aligned}$$

অর্থাৎ একাধিক জটিল রাশির যোগ বা বিয়োগফল পেতে আমরা তাদের x- এবং y-অক্ষ বরাবর উপাংশগুলিকে যোগ বা বিয়োগ ক'রব।

অয়লারের উপপাদ্যের ভিত্তিতে জটিল রাশির ত্রিকোণমিতিক রূপ থেকে আমরা সূচকীয় রূপে পৌঁছতে পারি। গুণ, ভাগ, উদ্‌ঘাতন (evolution), অবঘাতন (involution), অবকলন, সমাকলন প্রভৃতি গাণিতিক ক্রিয়াতে জটিল রাশির সূচকরূপ বেশী কার্যকর। এই উপপাদ্য অনুসারে

$$e^{\pm j\theta} = \cos\theta \pm j\sin\theta \quad (১\text{-}১২.৭)$$

$$\therefore \quad Re^{\pm j\theta} = R(\cos\theta \pm j\sin\theta) = R\cos\theta \pm jR\sin\theta$$
$$= x \pm jy \quad (১\text{-}১২.৮)$$

কাজেই বলা যায় যে, $Re^{\pm j\theta}$ রাশি ধ্রুবীয় নির্দেশ-তন্ত্রে জটিল রাশি নির্দেশ করছে—$R\cos\theta$ তার বাস্তব, $R\sin\theta$ তার অলীক অংশ। আবার অয়লার উপপাদ্য থেকেই পাওয়া যায়

$$\cos\theta = \tfrac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \quad (১\text{-}১২.৯ক)$$
$$\sin\theta = \tfrac{1}{2}(e^{j\theta} - e^{-j\theta}) \quad (১\text{-}১২.৯খ)$$

সুতরাং ধ্রুবীয় তন্ত্রে জটিল বাস্তব অংশ $R\cos\theta=\frac{1}{2}R(e^{j\theta}+e^{-j\theta})$ আর অলীক অংশ $R\sin\theta=R(e^{j\theta}-e^{-j\theta})/2j$ হয়; স্বভাবতই $Re^{j\theta}$ ও $Re^{-j\theta}$ অনুবন্ধী।

এখন $z_1z_2=R_1e^{j\theta_1}.R_2e^{j\theta_2}=R_1R_2e^{j(\theta_1+\theta_2)}$ (১-১২.১০ক)

এবং $z_1/z_2=R_1e^{j\theta_1}/R_2e^{j\theta_2}=(R_1/R_2)\,e^{j(\theta_1-\theta_2)}$ (১-১২.১০খ)

অর্থাৎ দুই জটিল রাশির গুণফলের মাত্রায় থাকে দুই মাত্রার গুণফল আর কোণের যোগফল; আর ভাগফলে থাকে দুই মাত্রার ভাগফল আর দুই কোণের অন্তরফল; অর্থাৎ সূচকরূপে জটিল রাশির গুণ এবং ভাগ খুব সহজেই হয়।

আবার যদি $z=Re^{j\omega t}$ [ω ধ্রুবরাশি আর t চলরাশি] হয়, তবে

$$\dot{z}=\frac{d}{dt}\cdot Re^{j\omega t}=j\omega\, Re^{j\omega t}=j\omega z \qquad (১\text{-}১২.১১)$$

অর্থাৎ জটিল রাশিকে তার ঘাতের ধ্রুবক দিয়ে গুণ ক'রে, লব্ধরাশিকে বামাবর্তে এক সমকোণে ঘোরালে অবকলন করার কাজ হয়। আবার

$$\int_0^t z.\,dt=\int_0^t Re^{j\omega t}.\,dt=\frac{Re^{j\omega t}}{j\omega}=-j\,\frac{z}{\omega} \qquad (১\text{-}১২.১২)$$

অর্থাৎ জটিল রাশির সমাকলন করতে হলে তাকে তার ঘাতের ধ্রুবক অংশ দিয়ে ভাগ করে দক্ষিণাবর্তে এক সমকোণ ঘোরাতে হয়। দোলন তথা স্পন্দনের আলোচনায় এই নিয়ম বিশেষ সুবিধা আনে।

১-১৩. সূচকীয় পদ্ধতিতে সরল দোলনের অবকল সমীকরণের সমাধান :

সরল দোলনের সমীকরণ $\ddot{x}+\omega^2x=0$ একটি একঘাত তথা রৈখিক (linear) দ্বিতীয় ক্রমের (second order) অবকল সমীকরণ। ১-৪ অনুচ্ছেদে সমাকলন ধ্রুবক দিয়ে গুণ ক'রে এর সমাধান করা হয়েছে। সেই সমাধানে (১-৪.৩) সাইন এবং কোসাইন দুই রূপই আসে। আমরা এইমাত্র দেখলাম যে এই দুই রাশিকে একযোগে সূচকীয় রূপে (১-১২.৮) প্রকাশ করা যায়। সুতরাং এই অবকল সমীকরণের সমাধান সূচকীয়রূপেই আসবে ধরে নেওয়া যায়। সমাধান আগে থেকে ধরে নিয়ে তাকে অবকল সমীকরণে খাপ খাইয়ে নেওয়াকে **পরীক্ষণ প্রথায়** (trial solution) সমাধান করা বলে। ধরা যাক

$$x=e^{pt},\ \text{তাহলে}\ \ddot{x}=p^2e^{pt}$$

$$\therefore \quad \ddot{x}+\omega^2 x=e^{pt}(p^2+\omega^2)=0$$

যেহেতু tর সকল মানে $e^{pt}=0$ হতে পারে না, তাই আমাদের ধরে নিতে হবে

$$p^2+\omega^2=0 \text{ বা } p=\pm j\omega$$

সুতরাং সমীকরণের বিশেষ সমাধান $x_1=e^{j\omega t}$ এবং $x_2=e^{-j\omega t}$

এবং সাধারণ সমাধান $x=Ax_1+Bx_2=Ae^{j\omega t}+Be^{-j\omega t}$

(১-১৩.১)

পরীক্ষণ প্রথা—এক্ষেত্রে আমরা এমন এক ফলন (function) তথা অপেক্ষক খুঁজি যাকে অবকলন করলে আমরা সুরুর সমীকরণটি ফিরে পাব। যেমন $x=e^{\pm j\omega t}$র যেকোনটি ধ'রে দুবার অবকলন করলেই $\ddot{x}+\omega^2 x=0$ পাই; তাই সমাধান হিসেবে যেকোনটিই গ্রাহ্য। এটা জানা ছিল বলেই পরীক্ষণ সমাধানের মান e^{pt} ধরে নেওয়া গেছে। সমাধানে অবকলনের পূর্বপরিচিতি আমাদের নিশানা দেখিয়েছে। সব সময়ে (যেমন সরল দোলনের ক্ষেত্রে) সরাসরি সমাকলন সম্ভব নয়। তাই অবকলন ফল জানা থাকলে সুবিধা হয়। **সমাধানে গোড়া থেকেই সমাকলনের মান ধরে নেওয়াকে পরীক্ষণ প্রথা** বলে।

এখানে আমরা দুটি বিশেষ সমাধান পাই। গণিতের তত্ত্বে বলে, যে-কোন একঘাত সুষম (homogeneous) অবকল সমীকরণের একাধিক নিরপেক্ষ সমাধান থাকলে তাদের যেকোন রৈখিক সমন্বয়ই সমীকরণের সাধারণ সমাধান। ১-১৩.১ এইভাবেই এসেছে। সমাকলন করলেই একটা করে ধ্রুবক আসে, তাই প্রতিটি বিশিষ্ট সমাধানকে আমরা আলাদা আলাদা ধ্রুবক (A, B) দিয়ে গুণ করেছি। আলোচ্য সমীকরণ দ্বিতীয় ক্রমের, সমাকলন দুবার হবে, সমাকলন ধ্রুবকও দুটি আসবে, তাই এসেছেও।

গণিতে এই ধরনের অবকল সমীকরণের সাধারণ সমাধান যে দুই বিশেষ সমাধানের সমন্বয়, এই ব্যাপারকে আমরা দুই গতির ভৌত নিরপেক্ষতা-নীতির (physical independence of motion) গণিতীয় রূপ ব'লে মনে করতে পারি। এই নীতি অনুসারে কোন কণার একই সঙ্গে একাধিক গতি থাকলে তাদের লব্ধিফল তাদের সদিশ্ সমষ্টি, কোন গতিটিই অপরটির দ্বারা প্রভাবিত হবে না; যেমন চলন্ত গাড়ী থেকে কোন বস্তু ফেলে দিলে সেটা গাড়ীর সমান্তরালে চলতে চায়; উঁচু জায়গা থেকে কোন বস্তুকে অনুভূমিক দিকে ঠেলে ফেললে আর একই সঙ্গে আর এক

বস্তুকে সোজা পড়তে দিলে তারা একই সঙ্গে মাটিতে পড়ে, উড়ন্ত পাখীকে বা বিমানকে গুলি করতে হলে তাদের গতিপথে সামনের দিকে বন্দুক তাক্ করতে হয়, একই ফুটোর মধ্যে দিয়ে দুই ভিন্ন বস্তু থেকে আলোকরশ্মি বিন্দুমাত্র প্রভাবিত না হয়েই চোখে আসে। ১১ অধ্যায়ে আলোচিত একাধিক স্বল্পবিস্তার **তরঙ্গের উপরিপাতন নীতি** এই ভৌত স্বাধীনতা নীতিরই পরিণতি। এখন

$$x = Ae^{j\omega t} + Be^{-j\omega t}$$
$$= A(\cos\omega t + j\sin\omega t) + B(\cos\omega t - j\sin\omega t)$$
$$= (A+B)\cos\omega t + j(A-B)\sin\omega t$$
$$= C\cos\omega t + D\sin\omega t \qquad (১\text{-}১৩.২)$$

১-১৩.১ এবং ১-১৩.২ সরল দোলনের যথাক্রমে সূচকীয় এবং ত্রিকোণমিতিক সমাধান ; শেষেরটি ১-৪.৩(গ) সমাধানের সঙ্গে অভিন্ন।

বিকল্প সূচকীয় সমাধান—১-১৩.১ সমীকরণে A এবং B নিজেরাই অনুবন্ধী জটিল রাশি। তারা যদি নিরপেক্ষ হ'ত তাহলে মোট ধ্রুবক সংখ্যা চার হ'ত, কিন্তু দুবার সমাকলন করে সমাধান হয় ব'লে ধ্রুবক সংখ্যা মাত্র দুটি হবে। A আর B অনুবন্ধী হলেই তা সম্ভব হতে পারে। তাদের Z ও Z' বলা যাক।

আবার যেহেতু Z এবং Z' প্রত্যেকেই জটিল রাশি, তাদের প্রত্যেকেরই দুটি ধ্রুবক, সুতরাং $Ze^{j\omega t}$ বা $Z'e^{-j\omega t}$—যেকোনটিকেই সাধারণ সমাধান বলা চলে। এদের প্রত্যেকেরই বাস্তব এবং অলীক অংশ থাকবে। দোলন বাস্তব ঘটনা ; জটিল রাশির x উপাংশ বাস্তব অংশ। তাই

$$x = \text{Re}\, Ze^{j\omega t} \text{ বা } \text{Re}\, Z'e^{-j\omega t} \qquad (১\text{-}১৩.৩)$$

আকারে সরল দোলনকে চিহ্নিত করা হয়। Re বলতে Real তথা বাস্তব অংশ বোঝায়। সুতরাং সরল দোলনের অবকল সমীকরণের ($\ddot{x} + \omega^2 x = 0$) সমাধানের হরেক রূপ :—

$$x = a\sin(\omega t \pm \phi) \qquad [\,১\text{-}৬.২ \text{ ও } ১\text{-}৪.৩(ক)\,]$$
$$= a\cos(\omega t \pm \phi) \qquad [\,১\text{-}৬.১ \text{ ও } ১\text{-}৪.৩(খ)\,]$$
$$= C\cos\omega t + D\sin\omega t \qquad [\,১\text{-}৬.৩(ক) \text{ ও } ১\text{-}১৩.২\,]$$
$$= Ae^{j\omega t} + Be^{-j\omega t}$$

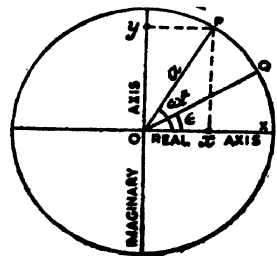
$$= Ze^{j\omega t} + Z'e^{j\omega t}$$

$$\left.\begin{array}{l} = \text{Re } Ze^{j\omega t} \\ \text{বা Re } Z'e^{-j\omega t} \end{array}\right\} \qquad [\text{ ১-১০.৩ }]$$

প্রতিটি সমাধানই সমভাবে গ্রাহ্য। প্রত্যেকটিতেই দুটি ক'রে স্বেচ্ছিক ধ্রুবক রয়েছে। তাদের মধ্যে a, ϕ বাস্তব, A, Bও তাই, কিন্তু Z ও Z' অনুবন্ধী জটিল রাশি।

১-১৪. সদিশ্ রাশি ও সরল দোলন :

আর্গান্দ্ চিত্রে $OP = a + jb = R(\cos\theta + j\sin\theta) = R\angle\theta$; সুতরাং সরলরেখা OP, সদিশ্ রাশির সামিল। যেহেতু জটিল রাশি, সদিশ্ রাশি এবং সরলরেখা প্রত্যেকেরই দুটি ক'রে নিরপেক্ষ অংশ, তাই সরলরেখা দিয়ে ভেক্টর বা সদিশ্ রাশি প্রকাশ করা সম্ভব। এই ভেক্টরকে স্থির সদিশ্ রাশি বলে। কাজেই সরল দোলনে নিমেষ সরণ ($x = a\cos\omega t$) স্থির ভেক্টর দিয়ে নির্দেশ করা যায়, তার মাত্রা (R) এবং নতিকোণ (θ), যথাক্রমে সরণ-বিস্তার আর দোলনদশা নির্দেশ করে। আবার $OP = Re^{\pm j\theta}$ অর্থাৎ $e^{\pm j\theta}(= \cos\theta \pm j\sin\theta)$ একক ভেক্টরের সমান, $+$ চিহ্নে তার বামাবর্তী এবং $-$ চিহ্নে দক্ষিণাবর্তী ঘূর্ণন নির্দেশ করবে।

ঘূর্ণ সদিশ্ রাশি—জটিল তলে $Re^{j\theta}$ সদিশ্ রাশির প্রতিরূপ। তার মাত্রা R এবং x-অক্ষের সঙ্গে নতিকোণ θ ; সুষম বেগে (ω) যদি θ কোণ বর্ধিত হতে থাকে তাহলে $\theta = \omega t$; তাই বলতে পারি $Re^{j\theta}$ এমন এক ভেক্টর যে মানে অপরিবর্তিত থেকে সমকৌণিক বেগে (ω) জটিল তলে বামাবর্তে ঘুরতে পারে (1.22 চিত্র)—তার দুই উপাংশ $x = R\cos\omega t$, এবং $y = R\sin\omega t$ দাঁড়ায়।

চিত্র 1.22—ঘূর্ণ সদিশ্ রাশি

আমরা ১৬ পৃষ্ঠায় দেখেছি যে XOX' বা YOY' ব্যাসের ওপর সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপই সরল দোলন। নির্দেশ বৃত্তে ঘূর্ণমান বিন্দুর, ধ্রুবীয় তন্ত্রে নিমেষ-স্থানাংক (a, ωt) দিয়ে নির্দেশ করা যায় ; a-র মান অচল কিন্তু ধ্রুবীয় কোণ নির্দিষ্ট হারে বদলায়—অর্থাৎ OP ঘূর্ণ-সদিশ্ রাশি। গতি Q থেকে সুরু হলে $\theta = (\omega t - \varepsilon)$ হ'ত এবং OP-র x-উপাংশ (1.22 চিত্র) Ox

$=a\cos(\omega t-\varepsilon)$ হ'ত। ঘূর্ণ ভেক্টরের অপর নিমেষ-উপাংশ Oy $[=a\sin(\omega t-\varepsilon)]$ সমবিস্তার ও সমপর্যায়ের আর এক সরল দোলন; দুয়ের মধ্যে এক সমকোণ বা $T/4$ দশান্তর।

তাহলে $Re^{j\omega t}$ আর $Re^{-j\omega t}$ দুই সমান বেগে ঘূর্ণমান বামাবর্তী ও দক্ষিণাবর্তী সদিশ্ রাশি। তাদের বাস্তব আর অলীক অক্ষের ওপর অভিক্ষেপ পরস্পর সমকোণে দুই সমান সরল দোলন সূচিত করে। R যদি নিজেই জটিল হয় তবে $Re^{j(\omega t-\varepsilon)}$ ঘূর্ণ সদিশ্; অর্থাৎ সে আগের সমমান ও সমকৌণিক-বেগ-সদিশ্, কেবল তার চলন বাস্তব অক্ষ থেকে ε কোণে বামাবর্তে সুরু হয়েছে। সরল দোলনের সংশ্লেষ প্রক্রিয়াতে (১০-৩ অনুচ্ছেদে) সরল দোলনের ঘূর্ণভেক্টর রূপ বিশেষ কার্যকর।

সদিশ্ প্রতিরূপে সরল দোলনের সমীকরণের সমাধান— ১-৩ অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে স্থিতিস্থাপক-কল্প প্রত্যানয়ক বলের ক্রিয়ায় কোন কণার সরল দোলন হয়। বলমাত্রেই সদিশ্ রাশি হওয়ায় গতির সমীকরণ হয়

$$\mathbf{F}=-s\mathbf{r} \quad \text{বা} \quad m\ddot{\mathbf{r}}+s\mathbf{r}=0$$

এর সমাধানে আমরা শক্তিসংরক্ষণ নীতি আর সমক্ষেত্রীয় বেগের সূত্র কাজে লাগাবো। প্রথমটির দরুন যেকোন নিমেষে স্পন্দকের স্থিতি ও গতিশক্তির সমষ্টি অক্ষুণ্ণ থাকে আর দ্বিতীয়টির ক্রিয়ায় স্পন্দকের ক্ষেত্রীয় বেগও (কেপ্‌লারের গ্রহপরিভ্রমণের দ্বিতীয় সূত্র) সদাই অক্ষুণ্ণ থাকে। তাহলে গণিতের ভাষায়

$$\tfrac{1}{2}mv_0{}^2+\tfrac{1}{2}m\omega^2r_0{}^2=\tfrac{1}{2}mv^2+\tfrac{1}{2}m\omega^2r^2 \qquad (১\text{-}১৪.১)$$

$$\text{এবং} \quad |(r\,d\theta/dt)|=r^2\dot{\theta}=h \qquad (১\text{-}১৪.২)$$

গতির অবকল সমীকরণকে একবার সমাকলন ক'রে এই ফল মিলেছে। এদের আবার সমাকলন করলে সাধারণ সমাধান পাওয়া যায়

$$\mathbf{r}=\mathbf{Z}e^{j\omega t}+\mathbf{Z}'e^{-j\omega t} \qquad (১\text{-}১১.৩)$$

তার বাস্তব অংশ

$$\mathbf{r}=\mathbf{A}\cos\sqrt{s/m}.t+\mathbf{B}\sin\sqrt{s/m}.t \qquad (১\text{-}১৪.৪)$$

আদ্য সরণ এবং আদ্য বেগের দুই প্রাথমিক সর্ত আরোপ করলে সমাধান দাঁড়ায়

$$\mathbf{r}=\mathbf{r}_0\cos\sqrt{s/m}.t+\mathbf{v}_0\sqrt{m/s}\sin\sqrt{s/m}.t \qquad (১\text{-}১৪.৫)$$

দেখ এই সমীকরণ ১-৪.৫ সমাধানের সঙ্গে তুলনীয়। সদিশ্ বা ভেক্টর **r** তাহলে আদি সরণ ও আদি বেগ দুই সদিশ্-সম্মিলিত রাশির সমষ্টি আর তাদের দুয়ের প্রত্যেকেরই মান সময়ের সরল অপেক্ষক। স্পন্দকের সঞ্চার-পথের কোন বিন্দুর স্থানাংক, যেকোন তির্যক-অক্ষ তন্ত্রে (x এবং y-এর বদলে ξ এবং η বসিয়ে) হবে

$$\xi = r_0 \cos\sqrt{s/m}.t \quad \text{এবং} \quad \eta = v_0\sqrt{m/s}.\sin\sqrt{s/m}.t$$

এই দুই সমীকরণ থেকে t অপসারিত করলে পাই

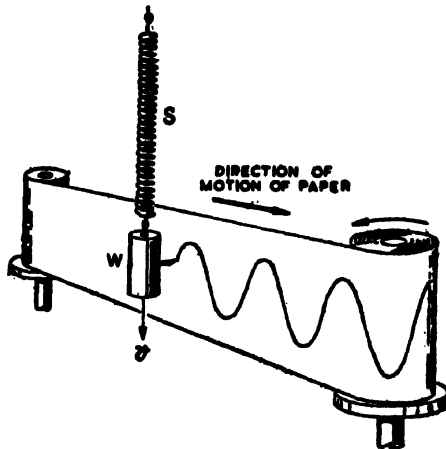
$$\xi^2/r_0^2 + \eta^2/[v_0^2(m/s)] = 1 \qquad (১\text{-}১৪.৬)$$

এই সমীকরণ তির্যক-অক্ষ তন্ত্রে উপবৃত্তের সমীকরণ ; উপবৃত্তের কেন্দ্র সরল দোলনের মধ্যক অবস্থানে আর তার দুই অনুবন্ধী ব্যাস বরাবর দুই অক্ষ। v_0 এবং r_0 সমদিশ্ বা সমমুখী (collinear) হলে দোলন রৈখিক হবে নচেৎ উপবৃত্তীয় পথে হবে।

২

মন্দিত দোলন
(Damped S.H.M.)

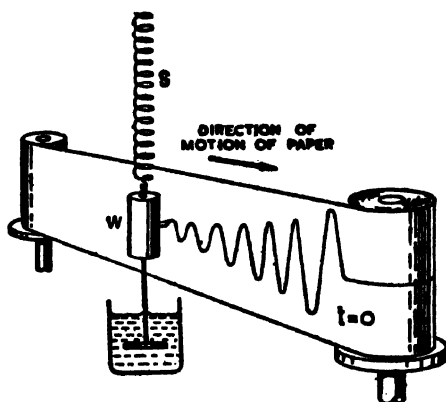
২·১. স্বভাবী ও স্ববশ দোলন :

যথাযোগ্য সর্তাধীনে স্থিতিস্থাপক-কম্প তন্ত্র মাত্রেরই দোলন হতে পারে। দোলন অনুপ্রস্থ (দোলক বা ক্যান্টিলেভার), অনুদৈর্ঘ্য (স্প্রিং বা U-নলে তরল), বা ব্যাবর্ত (মোচড় খাওয়া তার বা স্প্রিং) হতে পারে। প্রত্যানয়ক বল বা দ্বন্দ্বের মান, স্বল্পমান বিচলনের সমানুপাতিক হলে, স্পন্দন সরল দোলজাতীয় হয়। স্পন্দন সুরু হওয়ার পর বল বা দ্বন্দ্ব অপসারিত হলে বিচলিত সংস্থা স্বকীয় কম্পাংকে স্পন্দিত হতে থাকে। সেই স্পন্দনকে স্বাধীন, স্বভাবী বা স্ববশ (free) কম্পন বলে। এই স্ববশ কম্পন প্রায় অদমিত। কোন ভারী স্পন্দক বাতাসে কাঁপতে থাকলে তাকে অদমিত স্ববশ কম্পন বলা চলে। 2.1 চিত্রে এইরকম একটি স্পন্দন দেখানো হয়েছে; চওড়া শক্ত

চিত্র 2.1—সরল দোলনের রূপরেখা

কাগজের একটি পটি একটি বেলন থেকে সমবেগে খুলে গিয়ে আর একটি বেলনে জড়িয়ে যাচ্ছে। একটি খাড়া স্প্রিং-এর তলায় বাঁধা একটি ভারী বস্তু ওপরে-নিচে স্পন্দিত হচ্ছে; তার গায়ে লাগানো একটি হাল্‌কা লেখনী কাগজের

ওপর আলতো স্পর্শে কালির দাগ কেটে যাচ্ছে ; দুই গতির সমাবেশে কাগজের গায়ে অদমিত স্ববশ কম্পনের কাল-সরণ রেখা আঁকা হয়ে যাচ্ছে। লক্ষ্য কর, এই রেখা 1.6 চিত্রের কাল-সরণ রেখার সঙ্গে অভিন্ন।

বাস্তবে কিন্তু, স্পন্দনের মুক্ত কম্পনের বিস্তার অল্পবিস্তর হারে কমতে থাকে, শেষ পর্যন্ত থেমেই যায়। কারণ, স্পন্দকের ভেতরে-বাইরে ঘর্ষণ ও বাধা। ১-১১ অনুচ্ছেদে সরল দোলনের উদাহরণের আলোচনা প্রসঙ্গে সে কথা বারবার বলা হয়েছে। যেমন ধর, দোলকের সঙ্গে তার লম্বন-অক্ষের ঘর্ষণ বা বায়ুর সঙ্গে ঘর্ষণ ; সুরশলাকার স্পন্দনের সময়ে তার বাহুর ভিন্ন ভিন্ন স্তরগুলি যে পরস্পরের সাপেক্ষে পিছ্‌লে পিছ্‌লে এগোয়-পেছোয়, তার ফলে সান্দ্রতাজনিত আন্তঃস্তর বাধার উৎপত্তি ; এটি ভেতর থেকে বাধা। তাছাড়া বাইরে বায়ুর ঘর্ষণজনিত বাধা তো আছেই। এই দুই বাধার ক্রিয়ায় দোলন ক্রমশই অবদমিত বা মন্দিত হতে থাকে। **বাইরে ও ভেতর থেকে অল্পবিস্তর কিন্তু স্থিরমান বাধার ক্রিয়ায় ক্ষয়িষ্ণুবিস্তার দোলনকে মন্দিত স্বভাবী দোলন বলে।**

আগের চিত্রে ভরের তলায় একটি হাল্‌কা পিস্টন আটকে তাকে একপাত্র জলের মধ্যে ওঠানামা করতে দিলে তার স্পন্দনের কাল-সরণ রেখা

চিত্র 2.2—সরল দোলনের রূপরেখা

কিরকম হয় তা 2.2 চিত্রে দেখানো হয়েছে। এই দোলন মন্দিত বা অবদমিত দোলন ; বাধা অতিক্রম করতে প্রতি দোলনেই স্পন্দকের শক্তি কিছু কিছু ক'রে ক্ষয় হয়, তাই স্পন্দনবিস্তারও প্রতি চক্রে কমতে থাকে। এই অপচিত শক্তির

কিছুটা তাপে রূপান্তরিত হয়ে entropy তথা অলভ্য শক্তির ভাগ বাড়ায়, বাকিটা মাধ্যম মারফৎ বিকীরিত হয়। বাধা কম হলে অপচয় কম হয় এবং স্পন্দন দীর্ঘস্থায়ী হয়। সেইরকম দোলনের পর্যায়কালকে **অপচয়ী তন্ত্রের** (dissipative system) মুক্ত বা স্বভাবী কম্পনকাল বলে।

সরল দোলন বনাম মন্দিত দোলন—সরল দোলন আদর্শীকৃত অবাস্তব কল্পনামাত্র, মন্দিত দোলনই বাস্তবে ঘটে। দুই ক্ষেত্রেই গোড়াতে সরণ বা বেগ সঞ্চার ক'রে স্পন্দকে দোলনের যে শক্তি যোগানো হয়, তা একবারই মাত্র করা হয়। সরল দোলনে সেই শক্তি স্পন্দকেই সংরক্ষিত থাকে, কিন্তু মন্দিত দোলনে ধীরে ধীরে অপচিত হয়। কাজেই সরল দোলনে বিস্তার অক্ষুণ্ণ থাকে, মন্দিত দোলনে বিস্তার ক্রমে কমে। তাই **সরল দোলন সংরক্ষী ব্যবস্থা,** তা থেকে বিকিরণ হয় না ; আর **মন্দিত দোলন অপচয়ী ব্যবস্থা,** সে স্বনক তথা শব্দের উৎস হতে পারে। স্বভাবতই মন্দিত দোলনের তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ সরল দোলনের তুলনায় জটিলতর।

২-২. মন্দিত দোলনের গাণিতীয় বিশ্লেষণ :

মন্দিত দোলনে স্পন্দক অল্পাবিস্তর বাধা পায়। সরলতম ক্ষেত্রে বাধাবল নিমেষ-বেগের আনুপাতিক ধরা হয়। সরল দোলনে জড়তা-বলকে বাধা দেয় সরণ-অনুপাতী প্রত্যানয়ক বল আর মন্দিত দোলনে সেই বলেরই বিরুদ্ধে থাকে প্রত্যানয়ক বলের সঙ্গে নিমেষ-বেগের অনুপাতী বাধা বা রোধ বল। স্পন্দকের ভর m, একক সরণে প্রত্যানয়ক বল s, আর একক বেগে রোধ-বল r হলে ক্ষয়িষ্ণুবিস্তার দোলনের অবকল সমীকরণ দাঁড়াবে

$$m\ddot{x} = -sx - r\dot{x} \qquad (২\text{-}২.১)$$

অর্থাৎ

$$\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \qquad (২\text{-}২.২)$$

এখানে $2k\ (= r/m)$ একক বেগে প্রতিরোধী ত্বরণ আর $\omega_0^2\ (= s/m)$ একক সরণে সক্রিয় দার্ঢ্য ত্বরণ—এরা জাড্য ত্বরণের ($\ddot{x}$) বিরোধী।

২-২.২ মন্দিত দোলনের অবকল সমীকরণ। সরল দোলনের অবকল সমীকরণের (১-৪.১) মতোই এও রৈখিক, সমমাত্রা ধ্রুব-সহগ, দ্বিতীয় ক্রমের সমীকরণ, কেবল দ্বিতীয় পদটি বাড়তি। এর সমাধানও পরীক্ষণ প্রণালীতে (১-১৩.১) করা যায়। ধরা যাক সে সমাধান

$$x = f(t).e^{-kt} \qquad (২\text{-}২.৩)$$

২-২ চিত্রে যে, সময় t বাড়ার সঙ্গে বিস্তার x কমছে এবং কমাটা যে রোধ বলের জন্য ঘটছে তা দেখা গেছে। বিস্তার সময়-নির্ভর বলেই তাকে $f(t)$ অর্থাৎ সময়ের অপেক্ষক বলে নির্দেশ করা হয়েছে এবং নিমেষ-সরণ আর সরণ-বিস্তারের অনুপাত e^{-kt} রাশি ধরা হয়েছে। তাহলে

$$\dot{x}=\dot{f}(t)\,e^{-kt}-ke^{-kt}\,f(t)$$

আর $$\ddot{x}=\ddot{f}(t)\,e^{-kt}-ke^{-kt}\,\dot{f}(t)-ke^{-kt}.\,\dot{f}(t)+k^2e^{-kt}.f(t)$$

২-২.২তে x, $\dot{x}$ এবং $\ddot{x}$ এর মান বসালে আমরা পাব

$$e^{-kt}\,[\ddot{f}(t)-2k\,\dot{f}(t)+k^2f(t)+2k.\dot{f}(t)-2k^2f(t)+\omega_0{}^2f(t)]=0$$

যেহেতু t-র সকল মানে $e^{-kt}\neq 0$, তাই ওপরের সমীকরণ দাঁড়াচ্ছে

$$\ddot{f}(t)+(\omega_0{}^2-k^2).\,f(t)=0 \qquad (২\text{-}২.৪)$$

এটি সরল দোলনের অবকল সমীকরণ। সুতরাং তার সমাধান হবে

$$f(t)=A\cos\sqrt{\omega_0{}^2-k^2}.\,t+B\sin\sqrt{\omega_0{}^2-k^2}.\,t \qquad (২\text{-}২.৫ক)$$

$$=a\cos(\sqrt{\omega_0{}^2-k^2}.\,t-\phi)=a\cos(qt-\phi) \qquad (২\text{-}২.৫খ)$$

তাহলে সরণ $x=f(t).\,e^{-kt}=ae^{-kt}\cos(qt-\phi)$ (২-২.৬ক)

$$=(A\cos qt+B\sin qt)\,e^{-kt} \qquad (২\text{-}২.৬খ)$$

এবং বেগ $$\dot{x}=e^{-kt}[-qA\sin qt+qB\cos qt-kA\cos qt-kB\sin qt] \qquad (২\text{-}২.৭)$$

২-২.৬(ক) থেকে পাচ্ছি যে মন্দিত দোলন এমন এক সরল দোলন, যার বিস্তার ae^{-kt} এবং পর্যায়কাল $T=2\pi/q=2\pi/\sqrt{\omega_0{}^2-k^2}$ হবে।

আবার দোলনের আদি নিমেষে ২-২.৬(খ) থেকে পাচ্ছি আদি সরণ

$$x_0=A \qquad (২\text{-}২.৮ক)$$

আর ২-২.৭ থেকে তখন বেগ $\dot{x}_0=qB-kA=qB-kx_0$ (২-২.৮খ)

সুতরাং নিমেষ সরণ $x=e^{-kt}[A\cos qt+B\sin qt]$

$$=e^{-kt}\left[x_0\cos qt+\frac{\dot{x}_0+kx_0}{q}\sin qt\right]$$

$$=e^{-kt}\left[x_0(\cos qt+\frac{k}{q}\sin qt)+\frac{\dot{x}_0}{q}\sin qt\right] \qquad (২\text{-}২.৮)$$

২-২.৮ সমীকরণ মন্দিত দোলনে আদি সরণ ও আদি বেগ সম্বলিত নিম্নের সমাধানের প্রতিরূপ।

(ক) আদি সরণ নিয়ে চলা সুরু হলে $\dot{x}=0$ এবং সরণের প্রতিরূপ $x=e^{-kt}[x_0 \cos qt+(k/q)\sin qt]$

$$=e^{-kt}\left[x_0 \cos \sqrt{\omega_0^2-k^2}\,.\,t+\frac{k}{\sqrt{\omega_0^2-k^2}}\cdot \sin \sqrt{\omega_0^2-k^2}\,.t\right]$$

(২-২.৯ক)

(খ) আদি বেগ নিয়ে চলা সুরু হলে $x_0=0$ এবং তখন সরণের প্রতিরূপ হবে

$$x=\frac{\dot{x}_0}{q}\,e^{-kt}.\ \sin\ qt=\frac{\dot{x}_0\ e^{-kt}}{\sqrt{\omega_0^2-k^2}.t}\cdot \sin \sqrt{\omega_0^2-k^2}.t$$

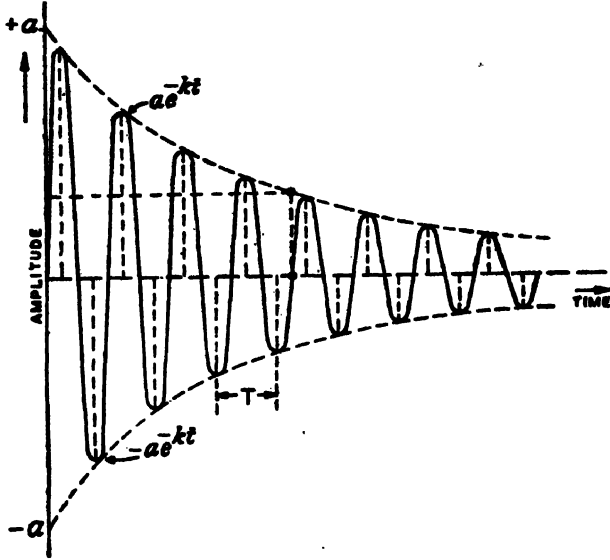
(২-২.৯খ)

বিশেষ দ্রষ্টব্য : ২-২.৪ অবকল সমীকরণের সমাধানে $(\omega_0^2-k^2)$ রাশিটিকে পজিটিভ ধরে নেওয়া হয়েছে অর্থাৎ স্প্রিং-ত্বরণ (ω_0) রোধজাত ত্বরণের (k) চেয়ে বেশী ধরা হচ্ছে; তাহলে $r^2/4m^2<s/m$ বা $r<\sqrt{4sm}$ হয়। কিন্তু মাধ্যমভেদে $\omega_0=k$ বা $\omega_0<k$ হতে পারে। তখন স্পন্দকের গতি সম্পূর্ণ ভিন্নপ্রকৃতি—দোলহীন; দোলন না হলে শব্দের উৎপত্তি হতে পারে না, তাই স্বনশাস্ত্রে তারা অবান্তর কিন্তু গতিবিদ্যায় তাদের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা আছে। আমরা এই অধ্যায়ের পরিশিষ্টে (২-৯) দোলহীন গতির কিছু আলোচনা ক'রব; তার সঙ্গে মন্দিত দোলনের সমীকরণের (২-২.২) বিকল্প পথে সমাধান ক'রব।

ক্ষয়-ধ্রুবকের গুরুত্ব : ওপরের আলোচনা থেকে দেখছি যে, $k(=\frac{1}{2}r/m)$ রাশিটি মন্দিত দোলনে স্পন্দনবিস্তারের ক্ষয়ের জন্য দায়ী—তাই তাকে ক্ষয়ধ্রুবক বলা হয়েছে। এই রাশিটি রোধজনিত ত্বরণের অর্ধেক। দোলনের ক্ষয় ও মন্দনে এর ভূমিকা সবচেয়ে বেশী।

(ক) স্পন্দনবিস্তার a, e^{-kt} সহগের হারে কমতে থাকে অর্থাৎ $1/k$ সেকেণ্ড পরে বিস্তার $1/e$ ভগ্নাংশে নেমে যায়। 2.3 চিত্রে এই স্পন্দনক্ষয় দেখানো হয়েছে। স্পন্দনবিস্তার সূচকীয়ভাবে ক্ষয়িষ্ণু রাশি।

(খ) সরল দোলনে পর্যায়কাল $(T_0=2\pi/\omega_0)$ স্পন্দকের স্প্রিং-ধর্ম-

নির্ভর। সেই স্পন্দকেরই স্ববশ দোলনে পর্যায়কাল ($T=2\pi/\sqrt{\omega_0^2-k^2}$) মাধ্যমের বাধার ওপরেও নির্ভর করে। দুই প্রতিরূপ থেকে দেখা যাচ্ছে $T>T_0$ এবং এই বৃদ্ধির জন্যেও ক্ষয়-ধ্রুবকই দায়ী। কেননা

চিত্র 2.3—মন্দিত দোলনের কাল-সরণ রেখা

$$T=\frac{2\pi}{q}=\frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2-k^2}}=\frac{2\pi}{\omega_0}\cdot\frac{1}{\sqrt{(1-k^2/\omega_0^2)}}\simeq\frac{2\pi}{\omega_0}\left(1+\frac{1}{2}\frac{k^2}{\omega_0^2}\right)$$

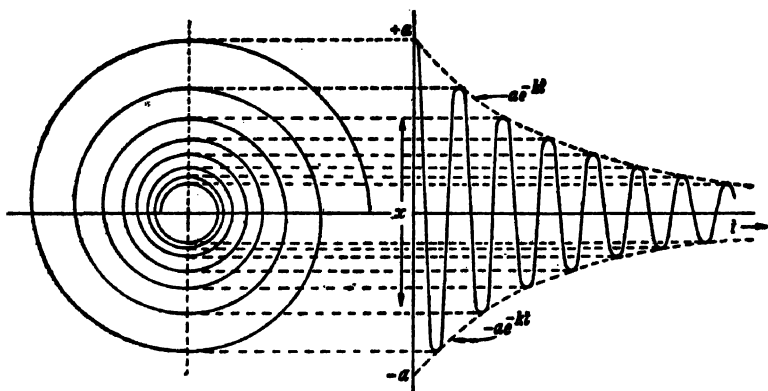
$$=T_0\left(1+\frac{1}{2}\frac{k^2}{\omega_0^2}\right) \qquad (২\text{-}২.১০)$$

সাধারণত k-র মান অল্প হওয়ায় পর্যায়কালের বৃদ্ধি ($k^2/2\omega_0^2$) সামান্যই হয়। লক্ষ্যণীয় যে, ক্ষয়-ধ্রুবক শুধু যে বিস্তার কমায় তা নয়, কম্পাংকও কমায়।

(গ) ক্ষয়-ধ্রুবকের মান শেষ অবধি নিয়ন্ত্রণ করে যে, গতি দোলহীন হবে, না মন্দিত দোলন হবে। আমরা দেখছি যে দোলন হতে পারে কেবল তখনই যখন $\omega_0>k$ হবে, নচেৎ নয়।

২-৩. মন্দিত গতির জ্যামিতিক প্রতিরূপ : সর্পিল গতি (spiral motion) :

আমরা দেখেছি (১-৭ অনুচ্ছেদ) যে সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপ সরল দোলন। সেই নজির টেনে মন্দিত দোলনকে সমকৌণিক (equiangular) সর্পিলগতির অভিক্ষেপ বলে ধরা যায়।

সান্দ্র মাধ্যমে কোন কণা সুষম চক্রগতিতে ঘুরতে থাকলে শক্তি অপচয়ের ফলে গতিপথের ব্যাস ক্রমশই কমতে থাকে। কমার পরিমাণ প্রতি চক্রে

চিত্র 2.4—মন্দিত দোলনের অভিক্ষেপ

সমানুপাতিক। সান্দ্র বাধার বা শক্তি বিকিরণের ফলে বেগ ক্রমশই কমে যেতে থাকে। তাই কণাটি সমকৌণিক বেগে কেন্দ্রের দিকে এগোতে থাকে (চিত্র 2.4)। তখন তার সঞ্চারপথ প্রতিটি ব্যাসার্ধকে সমান কোণে ছেদ করে (সুষম চক্রগতিতে ব্যাসার্ধ সঞ্চারপথকে সর্বদাই সমকোণে ছেদ করে)। কণাটির রৈখিক বেগ (v) ব্যাসার্ধের সঙ্গে θ কোণে থাকলে স্পর্শক বরাবর রৈখিক বেগ $v \sin \theta$ এবং কৌণিক বেগ $v \sin \theta/r$ হবে ; বাধা দুর্বল হলে এই কৌণিক বেগে পরিবর্তন যৎসামান্য, সুতরাং পর্যায়কালও প্রায় অক্ষুণ্ণই (২-২.১০) থাকে।

সর্পিল পথের আদি ব্যাসার্ধ a_0 এবং একক বেগে বাধা বল r হলে, m ভরের কণা যদি t সময় ধ'রে সেই সর্পিল পথে চলে তাহলে ক্ষয়-ধ্রুবকের গড় মান হবে $\frac{1}{2}(r/m)$ এবং t সময় পরে পথের ব্যাসার্ধ দাঁড়াবে

$$a_t = a_0 e^{-rt/2m} = a_0 e^{-kt} \qquad (২\text{-}৩.১)$$

অর্থাৎ কণার পথব্যাসার্ধ বা দোলনবিস্তার সূচকীয় হারে কমতে থাকবে। এখন

$$\ln(a_t/a_0) = -\tfrac{1}{2}(r/m)t = -kt \qquad (২\text{-}৩.২)$$

অর্থাৎ মূলবিন্দু থেকে কণার দূরত্বের লগারিদ্‌মের মান ($\ln a_t$) সময়ের (t) সঙ্গে কমতে থাকে। তাই এই পথকে লগারিদ্‌মশ্রেণীর সর্পিল পথও বলে।

1.6 চিত্রে যেভাবে সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপে কাল-সরণ রেখা টানা হয়েছে তেমনি করেই 2.4 চিত্রে কাল-সরণ রেখা টানা যায়। এই রেখাই 2.2 চিত্রের কাল-সরণ রেখা।

২-৪. ঘর্ষণজনিত মন্দন : শ্লথন-কাল :

সরল দোলনকে ভেতর এবং বাইরে থেকে সক্রিয় সান্দ্রতা- এবং ঘর্ষণ-বল মন্দিত করে। সরলতম ক্ষেত্রে বাহ্যিক ঘর্ষণ-বল নিমেষ-বেগের সমানুপাতিক অর্থাৎ বাধাবল $F_f = -r.\dot{x}$; তাহলে কেবলমাত্র ঘর্ষণসীমিত গতির সমীকরণ হবে

$$m\ddot{x} + r\dot{x} = 0 \text{ বা } \ddot{x} + (r/m)\,\dot{x} = 0$$

$$\text{বা} \qquad m(\ddot{x} + \dot{x}/\tau) = 0 \qquad (\text{২-৪.১})$$

এখানে τ একটি ধ্রুবরাশি $\equiv m/r$; স্পষ্টতই বোঝা যাচ্ছে τ এর ঘাত বা মাত্রক, সময়ের (t) সামিল। তাহলে যেহেতু $m \neq 0$, আমরা ২-৪.১ কে

$$(\dot{v} + v/\tau) = 0 \qquad (\text{২-৪ ২})$$

রূপে লিখতে পারি। এই নতুন রাশি τ কে শ্লথন-কাল (relaxation time) বলে। তাহলে

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{v}{\tau} \text{ বা } \frac{dv}{v} = -\frac{dt}{\tau}$$

$$\therefore \quad \int_{v_0}^{v_t} \frac{dv}{v} = -\frac{1}{\tau}\int_0^t dt \; [\text{এখানে } t=0 \text{ নিমেষে বেগ} = v_0\,]$$

$$\text{অর্থাৎ} \quad \ln(v_t/v_0) = -t/\tau \quad \text{বা} \quad v_t = v_0\, e^{-t/\tau} \qquad (\text{২-৪.৩})$$

দেখা যাচ্ছে যে, সরণবিস্তারের মতো বেগও সূচকীয় (exponential) হারে কমতে থাকে ; τ সময় পরে বেগ আদি বেগের $1/e$ ভগ্নাংশ হয়ে দাঁড়ায়। তাই τ রাশিকে কাল-ধ্রুবকও (time constant) বলে। L-R বা C-R তড়িৎ-বর্তনীতে সময়ের সঙ্গে তড়িৎ-ধারার মাত্রার সম্পর্ক ($i = i_0\ e^{-t/\lambda}$), এই সমাধানের সঙ্গে অভিন্ন আর যান্ত্রিক এবং বৈদ্যুতিক প্রত্যক্ষ উপমিতি থেকে (৮-২ অনুচ্ছেদ) বেগ এবং বিদ্যুৎধারা সমতুল রাশি।

২-২.২ সমীকরণের সঙ্গে ২-৪.১ তুলনা ক'রে দেখছি $2k = 1/\tau$; অর্থাৎ ২-২.৯(খ) থেকে আমরা অল্প দমনে সরণের প্রতিরূপকে লিখতে পারি

$$x = \frac{\dot{x}_0}{\omega_0}\, e^{-t/2\tau} \sin \omega_0 t \qquad (\text{২-৪.৪})$$

২-৫. মন্দিত দোলনে শক্তি :

সরল দোলনের মতোই এখানে স্পন্দকের শক্তি স্থিতি ও গতিশক্তির মধ্যে বারবার পর্যাবৃত্ত হচ্ছে। এখানেও যে কোন নিমেষে মোট শক্তির মান

$$E = K + V = \tfrac{1}{2}m\dot{x}^2 + \tfrac{1}{2}sx^2 \qquad (২\text{-}৫.১)$$

এখন ২-২.৬(ক) থেকে সরণ $x = ae^{-kt}\cos(qt-\phi)$

তাহলে বেগ $\dot{x} = ae^{-kt}[-k\cos(qt-\phi) - q\sin(qt-\phi)]$

সুতরাং গতিশক্তি $K = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 = \frac{1}{2}ma^2e^{-2kt}[k^2\cos^2(qt-\phi) + q^2\sin^2(qt-\phi) + kq\sin 2(qt-\phi)]$

এবং স্থিতিশক্তি $V = \frac{1}{2}sx^2 = \frac{1}{2}m\omega_0^2\, a^2e^{-2kt}\cos^2(qt-\phi)$
$= \frac{1}{2}m(k^2+q^2)a^2e^{-2kt}.\cos^2(qt-\phi)]$

∴ মোট শক্তি $E = K + V = \frac{1}{2}ma^2e^{-2kt}[k^2\cos^2(qt-\phi) + q^2\sin^2(qt-\phi) + kq\sin 2(qt-\phi) + (k^2+q^2)\cos^2(qt-\phi)]$

$$= \tfrac{1}{2}ma^2e^{-2kt}[2k^2\cos^2(qt-\phi) + kq\sin 2(qt-\phi) + q^2]$$

$$= \tfrac{1}{2}ma^2e^{-2kt}[q^2 + 2k\cos(qt-\phi)\{k\cos(qt-\phi) + q\sin(qt-\phi)\}]$$

$$= \tfrac{1}{2}ma^2q^2e^{-2kt} + ma^2k^2\cos(qt-\phi)\,e^{-2kt}\left\{\cos(qt-\phi) + \frac{q}{k}\sin(qt-\phi)\right\}$$

$= \frac{1}{2}ma^2q^2e^{-2kt}$ [যেহেতু এক পূর্ণ দোলনে তথা এক চক্রে সাইন ও কোসাইনের মোট মান শূন্য]

$$= \tfrac{1}{2}ma^2(\omega_0^2 - k^2)\,e^{-2kt} \qquad (২\text{-}৫.২)$$

সামান্য দমনে $E = \frac{1}{2}ma^2\omega_0^2\, e^{-t/\tau}$ (যেহেতু ছোট রাশির বর্গ k^2 নগণ্য হয়)

$$= E_0\, e^{-t/\tau} \qquad (২\text{-}৫.৩)$$

এখানে E_0 স্পষ্টতই দোলকে সঞ্চারিত আদি শক্তির মান।

এই গণিতীয় বিশ্লেষণ থেকে আমরা সিদ্ধান্ত করতে পারি

(ক) বেগের মতোই (২-৪.৩) τ সময় পরে স্পন্দকের মোট শক্তিও তার আদি মানের $1/e$ ভগ্নাংশ হয় ;

(খ) মন্দন-গুণাংকের $(2k)$ ক্রিয়ায় শক্তির এই ক্ষয় হতে থাকে ;

(গ) মন্দন-গুণাংক $(2k)$ শ্লথন-কালের (τ) অন্যোন্যকের সমান ।

শক্তিক্ষয় (E_r) প্রধানত ঘর্ষণ-বলের ক্রিয়াতেই হয় এবং অপচিত শক্তিই তাপ এবং বিকিরিত শক্তিতে রূপান্তরিত হয় । ২-৫.৩ সমীকরণ থেকে শক্তি অপচয়ের সময়-হার

$$P_r=\frac{d}{dt}(E)=-\frac{E_0}{\tau}\cdot e^{-t/\tau}=-\frac{1}{2k}m\omega_0^2a^2e^{-t/\tau} \quad (২\text{-}৫.৪)$$

অর্থাৎ শক্তি-অপচয়ের সময়-হার আদি শক্তি ও শ্লথন-কালের অনুপাতের সমান ।

আবার যেকোন নিমেষে স্পন্দকের গতিশক্তি

$$K=\tfrac{1}{2}mv^2=\tfrac{1}{2}m(v_0e^{-t/\tau})^2=\tfrac{1}{2}mv_0^2.e^{-2t/\tau}=K_0e^{-2t/\tau} \quad (২\text{-}৫.৫)$$

$$\therefore \quad \ln(K/K_0)=-2(t/\tau) \quad (২\text{-}৫.৬)$$

অর্থাৎ t অবকাশ পরে

(১) গতিশক্তির ক্ষয়- (K_0/K) লগারিদ্‌ম্ বেগের ক্ষয়ের লগের দ্বিগুণ

(২) গতিশক্তির ক্ষয়ের হারের লগারিদ্‌ম্ শ্লথন কালের অর্ধেক ; অর্থাৎ শ্লথন কাল দিয়েও বেগ ও গতিশক্তির ক্ষয় নির্দেশ করা যায় ।

শক্তি-অপচয়ের হার থেকে মন্দিত দোলনের অবকল সমীকরণে পৌঁছান সম্ভব, ঠিক যেমন ১-৮ অনুচ্ছেদের শেষে সরল দোলনের যেকোন নিমেষে মোট শক্তি বিবেচনা ক'রে তার অবকল সমীকরণে পৌঁছানো গিয়েছিল । এখন

শক্তি অপচয়ের হার $\quad P_r=$ বাধাবল $\times$ বেগ $=-r\dot{x}\times\dot{x}=-r\dot{x}^2$

আবার ২-৫.১ থেকে $\quad \dot{E}=m\dot{x}\ddot{x}+sx.\dot{x}$

যখন মন্দিত দোলন নিয়মিতভাবে হচ্ছে তখন শক্তি যোগান দেওয়ার হার, শক্তি অপচয়ের হারের সমান হবে তাহলে

$$m\dot{x}\ddot{x}+s\dot{x}x=-r\dot{x}^2$$

অর্থাৎ $\quad m\ddot{x}+r\dot{x}+sx=0 \quad (২\text{-}২.১)$

উৎকর্ষ-অনুপাত (Q, Quality factor)—যেকোন স্পন্দকের ক্ষেত্রেই সংজ্ঞানুসারে

$$Q = \frac{2\pi\ (\text{মোট শক্তি})}{\text{এক দোলনে শক্তির ক্ষয়}} = \frac{2\pi E}{P_r/n} = \frac{2\pi n E}{P_r} = \frac{qE}{P_r}$$

(২-৫.৭)

এখানে n সেকেণ্ডে স্পন্দনের সংখ্যা এবং $q = 2\pi/$পর্যায়কাল ; এখন E/P_r রাশিটির ঘাত বা মাত্রক (dimension) দাঁড়ায় সময়, সুতরাং Q ঘাতবিহীন সংখ্যা। ২-৫.৪ থেকে পাব

$$Q = q\tau \simeq \omega_0 \tau \ (\text{যদি মন্দন-গুণাংক } 2k \text{ ছোট হয়।}) \qquad (২-৫.৮)$$

উৎকর্ষ-অনুপাত থেকে অবক্ষয় হারের একটা আন্দাজ পাওয়া সম্ভব। Q বেশী হলে শ্লথন-কালও ($\tau = m/r$) বেশী হবে অর্থাৎ স্পন্দনে বাধাবল কম হবে, তাহলে শ্লথন দীর্ঘস্থায়ী হবে। দেখা গেছে ভূকম্প তরঙ্গে Q-এর মান 250 থেকে 1400, পিয়ানো বা বেহালার স্পন্দনশীল তারে 1000, উদ্দীপিত (excited) পরমাণুতে 10^7, উদ্দীপিত কেন্দ্রীণে 3×10^{12} হয়।

২-৬. দোলন-অবক্ষয় :

মন্দিত দোলনে বিস্তার অবক্ষয়ের আলোচনাই সবচেয়ে বেশী গুরুত্বপূর্ণ। এই প্রসঙ্গে নানা রাশির অবতারণা করা হয়েছে। তাদের মধ্যে মন্দন-গুণাংক ($2k$), শ্লথন-কাল (τ) এবং বিস্তারক্ষয়ের লগারিদম্, এরাই প্রধান।

(ক) **ক্ষয়ধ্রুবক বা মন্দন-গুণাংক**—এই রাশির ভূমিকা নিয়ে আলোচনা ২-২ এবং ২-৫ অনুচ্ছেদে প্রসঙ্গক্রমে হয়েছে। তার সঙ্গে সংশ্লিষ্ট রাশি শ্লথন-কাল, কালধ্রুবক বা ক্ষয়মানকের (decay modulus) অবতারণাও ২-৪.৩ এবং ২-৫.৩ সমীকরণে ($\tau = m/r$) করা হয়েছে। এই সময়ে বিস্তার (a) বা শক্তি (E) ক্ষয় পেয়ে তাদের মানের $1/e$ ভগ্নাংশে পৌঁছায়। কাজেই $\tau = m/r = 1/2k$ ব'লে ভর যত বেশী হবে মন্দন তথা ক্ষয় ততই কম হবে। তাই দোলকের পিণ্ড ভারী করা হয়। এসব কথা আগেও বলা হয়েছে।

(খ) **বিস্তার-ক্ষয়ের লগারিদম্**—এই রাশিটি ক্ষেপক গ্যালভ্যানো-মিটারের স্পন্দনে অতি পরিচিত প্রাচল। মন্দিত দোলনে বিস্তার (ae^{-kt}) সময়ের সঙ্গে কমতে থাকে। বিস্তার-হ্রাস দুভাবে চিহ্নিত করা হয়—মধ্যক অবস্থানের (i) একই দিকে বা (ii) দুদিকে বিস্তারের মান নিয়ে। প্রথম ক্ষেত্রে

$$x_0/x_1 = x_1/x_2 = x_2/x_3 = \cdots = x_{n-1}/x_n = e^{\delta}$$

$$\therefore \quad e^{n\delta} = x_0/x_n \quad \text{অর্থাৎ } \delta = \frac{1}{n}\ln\frac{x_0}{x_n} \qquad (২\text{-}৬.১)$$

দ্বিতীয় ক্ষেত্রে $x_0/x_1' = x_1'/x_2' = x_2'/x_3' = \cdots = x'_{n-1}/x'_n$
$= e^{\delta'} = e^{\delta/2}$

$$\text{অর্থাৎ,} \quad \delta' = \frac{1}{n}\ln\frac{x_0}{x_1'} = \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{n}\ln\frac{x_0}{x_1} = \frac{\delta}{2} \qquad (২\text{-}৬.২)$$

স্বভাবতই ক্ষয়-ধ্রুবক এবং লগ্-হ্রাস (log decrement), সম্পর্কিত রাশি। মধ্যক অবস্থানের একই দিকে দুই ক্রমিক বিস্তারের মধ্যবর্তী কাল স্পন্দকের পর্যায়কালের সমান। তাহলে

$$\frac{x_0}{x_1} = e = \frac{ae^{-kt}}{ae^{-k(t+T)}} = e^{kT}\ ; \ \text{অর্থাৎ} \quad \delta/T = k \qquad (২\text{-}৬.৩)$$

পরীক্ষণ থেকে δ এবং T-র মান সহজেই মেলে। কাজেই ক্ষয়ধ্রুবক (k) বা মন্দন গুণাংকের ($2k$) মান সহজেই বার করা যায়। তা থেকে বাধাবল ($r = 2mk$) এবং প্রত্যানয়ক বলের ($s = m\omega_0^2$) মান বার করা যায় কারণ $T = 2\pi/(\omega_0^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}$ হয়।

মন্দিত দোলনে স্পন্দনপিছু অপচিত শক্তির মানও বার করা সম্ভব, কেননা প্রতি দোলনের শেষে স্পন্দকের মোট শক্তির সবটাই স্থিতিশক্তি এবং ক্রমিক দোলনের শেষে তাদের মান যথাক্রমে $sx_r^2/2$ এবং $sx^2_{r+1}/2$; কাজেই প্রতি দোলনে আনুপাতিক শক্তি-হ্রাসের গড় হবে

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{sx_r^2 - sx^2_{r+1}}{sx_r^2} = 1 - \left(\frac{x_{r+1}}{x_r}\right)^2$$
$$= 1 - (e^{-\delta})^2 = 1 - e^{-2\delta}$$

$\simeq 1 - (1 - 2\delta)$ [সূচকীয় প্রসারণে ছোট রাশি δ-র উচ্চতর মান বাদ দিয়ে]

$$= 2\delta = 2kT\ (২\text{-}৬.৩) = T/\tau \qquad (২\text{-}৬.৪)$$

দেখা যাচ্ছে পূর্ণ এক দোলনে শক্তিহ্রাসের হার সরাসরি মন্দন-গুণাংক বা ক্ষয়-ধ্রুবকের সমানুপাতিক আর শ্লথনকালের ব্যস্তানুপাতিক।

উদাহরণ—(১) একটি মন্দিত স্পন্দকের প্রথম বিস্তার 50 সেমি, একই দিকে শততম বিস্তার 5 সেমি। তার পর্যায়কাল 2.3 সে হলে ক্ষয়-ধ্রুবক এবং প্রথম স্পন্দনে বিস্তারক্ষয় বার কর।

সমাধান—এখানে বিস্তারের লগ্-হ্রাস δ এবং ক্ষয়-ধ্রুবক k ধরি। তাহলে

$$\delta = kT = \frac{1}{n}\ \ln\frac{x_1}{x_{100}} = \frac{1}{100}\ln\frac{50}{5}$$

$$= 0{\cdot}01 \times 2.303 \times \log 10 = 0.02303$$

$\therefore\quad k = 0.02303/2.3 = 0.01$

মধ্যক অবস্থান থেকে প্রথম বিস্তারপ্রান্তে পৌঁছতে $T/4$ সে সময় লাগে। সেই সময়ে হ্রাসের পরিমাণ হয় $kT/4 = 0.01 \times 2.3/4 = 0.006$: সুতরাং প্রথম বিস্তারে হ্রাসের পরিমাণ $a\delta = 50 \times 0.006 = 0.3$ সেমি।

(২) 200/সে কম্পাংকের কোন স্পন্দকের শ্লথন কাল $\frac{1}{2}$ সে হলে তার অদমিত কম্পাংক কত ?

সমাধান—শ্লথন-কাল $\tau = 1/2k$ সুতরাং এখানে $k = 1/2\tau = 1$ সে। আবার স্পন্দনাংক

$$\omega_0 = \sqrt{q^2 + k^2}\ \text{তাহলে}\ n_0 = \sqrt{\frac{q^2}{4\pi^2} + \frac{1}{4\pi^2}}$$

$$= \sqrt{200^2 + 1/(4 \times 3.14)^2} \simeq 200/\text{সে}$$

(৩) দশ গ্রাম ভরের কণাকে সচল ক'রে পরপর চারিটি বিস্তার 33.75 সেমি, 22.5 সেমি, 15 সেমি এবং 10 সেমি হতে দেখা গেল। পর্যায়কাল দশ সে হলে সক্রিয় বাধা বল কত ? অবাধ স্পন্দনে বিস্তার কত ?

সমাধান—এখন চারটি বিস্তারের ক্রমিক অনুপাত $\frac{33.75}{22.5} = \frac{22.50}{15}$

$= \frac{15}{10} = 1.5$ (ধ্রুবক)। স্পন্দন এক্ষেত্রে মন্দিত দোলন। আবার লগ্-হ্রাস

$$\delta' = \delta/2 = kT/2\ \text{এবং}\ e^{kT/2} = x'_1/x'_2 = 1.5$$

$$\therefore\quad kT/2 = 2.303 \log 1.5\ ;\ \text{তাহলে}\ \ k = \frac{2.303 \times 0.1761}{10/2}$$

$$\text{কাজেই}\ r = 2km = \frac{2.303 \times 0.1761}{10} \times 10 = 1.623\ \text{ডাইন/বেগ}$$

$$\text{আবার}\quad x_0 = x'_1 e^{kT/4} = 33.75 \times e^{kT/2 \times \frac{1}{2}}$$

$$= 33.75 \times (1.5)^{\frac{1}{2}} = 42.55\ \text{সেমি}$$

(৪) দশ গ্রাম ভরের ওপর 10 ডাইন/সেমি প্রত্যানয়ক বল এবং 2 ডাইন-সে/সেমি বাধাবল সক্রিয়। তাকে যদি স্থির অবস্থা থেকে 20 গ্রাম-সেমি/সে ঘাত বল প্রয়োগে বিচলিত করা হয় তবে তার গতীয় সমীকরণ কি হবে ?

সমাধান—এখানে $\omega_0^2 = s/m = 1$ এবং $k^2 = r^2/4m^2 = 0.01$; অর্থাৎ $\omega > k$, তাই কণার গতি মন্দিত দোলন। স্পষ্টতই আদি বেগ দিয়ে তার স্পন্দন সুরু। তাহলে ২-২.৯খ অনুযায়ী

$$x = \frac{\dot{x}_0}{(\omega_0^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot e^{-kt} \sin (\omega_0^2 - k^2)^{\frac{1}{2}} . t$$

এখানে $\omega_0^2 = 1,\ k^2 = 0.01,\ k = 0.1$ এবং

$$\dot{x}_0 = \text{ঘাতবল/ভর} = 20/10 = 2 \text{ সেমি/সে}$$

$$\therefore \quad x = \frac{2}{\sqrt{0.99}} e^{-t/10} \sin \sqrt{0.99}.t$$

$$= 2e^{-0.1t} \sin \sqrt{0.99}.t / \sqrt{0.99}$$

২-৭. মন্দিত দোলনের উদাহরণ :

বাস্তবে দোলন বা স্পন্দনমাত্রেই মন্দিত। ১-১১ অনুচ্ছেদে আলোচিত প্রতিটি উদাহরণই যে দমিত তা সেখানেই বলা হয়েছে। বায়ুতে স্পন্দন হলে মন্দন তুলনায় লঘু, জলে অপেক্ষাকৃত গুরু। পরীক্ষাগারে সরল বা যৌগিক দোলক, স্পন্দনশীল সুরশলাকা, নর্তনশীল সটান তার, সাধারণ তুলার সূচক, গ্যালভ্যানোমিটারের কুণ্ডলী বা চুম্বকশলাকার দোলন, প্রতিটিই লঘুমন্দিত।

তাই যৌগিক বা ব্যাবর্ত দোলকে সংশোধিত ও বাস্তব অবকল সমীকরণটি লেখা উচিত $I\ddot{\theta} + r\dot{\theta} + c\theta = 0$ রূপে। **ক্ষেপক গ্যালভ্যানোমিটারের কুণ্ডলীর দোলন**ও এইরকমই মন্দিত দোলন—বায়ুর সান্দ্রতা বা কুণ্ডলীর লম্বন-সূত্রের ঘর্ষণ, দোলনে যান্ত্রিক বাধা (r_m) আনে। তবে এই দোলন চুম্বকক্ষেত্রে হয় ব'লে বিদ্যুচ্চুম্বকীয় বাধাবলও থাকে এবং তা নিয়ন্ত্রণাধীন।

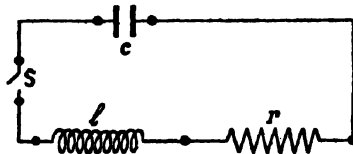
কুণ্ডলীর পরিবাহী তারগুলি চৌম্বকক্ষেত্রে দুলতে থাকায় কুণ্ডলীর সঙ্গে যুক্ত আবেশরেখার সংখ্যা (অর্থাৎ ফ্লাক্সের) প্রত্যাবর্তী ভাবে বদলাতে থাকে ; ফলে কুণ্ডলীতে বিদ্যুৎচুম্বকীয় আবেশের দরুন বিরোধী আবর্ত (eddy) বিদ্যুৎধারার উৎপত্তি হয়। লেনৃজের সূত্রানুযায়ী সে এই দোলনকে বাধা দেয়।

কুণ্ডলীতে পাকের সংখ্যা n, পাক প্রতি ক্ষেত্রফল A, কুণ্ডলীর স্বকীয় বৈদ্যুতিক রোধ R, বহির্বর্তনীতে শ্রেণীতে যুক্ত রোধ R' এবং যন্ত্রে অরীয় (radial) চৌম্বকপ্রাবল্য H হলে, একক কৌণিক বেগে বিদ্যুৎচুম্বকীয় মন্দন-বল $n^2A^2H^2/(R+R')$ হয় ; তাহলেই দেখ, R' বদল ক'রে এই বাধা বাড়ানো যেতে পারে ; এমনকি প্রয়োজনীয় রোধ অন্তর্ভুক্ত ক'রে কুণ্ডলীর গতি দোলহীন করা যায়। পরীক্ষণকালে ক্রান্তিক (critical) মন্দনরোধ বহির্বর্তনীতে অন্তর্ভুক্ত ক'রে কাজ করা হয়। সুতরাং গ্যালভ্যানোমিটার কুণ্ডলীর দোলন

$$I\ddot{\theta}+\left(r_m+\frac{n^2A^2H^2}{R+R'}\right)\dot{\theta}+c\theta=0 \qquad (২\text{-}৭.১)$$

সমীকরণ দিয়ে নির্দেশ করা হয়।

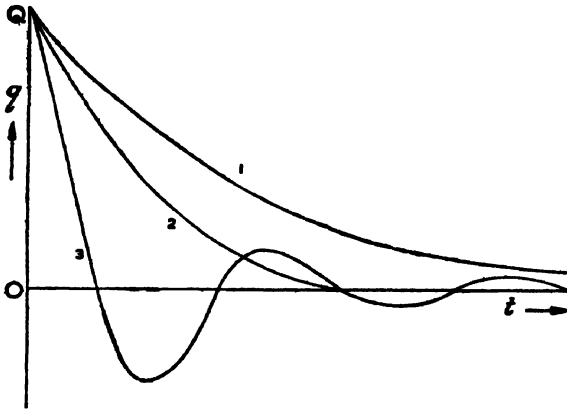
সুবেদী **দোলনী চুম্বকমান** যন্ত্রেও বিদ্যুৎচুম্বকীয় আবেশজনিত বাধা এনে চুম্বকশলাকার দোলনহ্রাস দ্রুততর করা হয়। সেই উদ্দেশ্যে শলাকাটিকে তামার ছোট বাটির মধ্যে দুলতে দেওয়া হয়। তাতে দোলন্ত চুম্বকরেখাগুলি তামার (পরিবাহী) বাটিকে ছেদ ক'রে প্রত্যাবর্তী আবর্ত ধারা আবিষ্ট করে। এই আবিষ্ট তড়িৎধারার বাধা শলাকার দোলন তাড়াতাড়ি থামিয়ে দেয়।

L-C-R বর্তনীতে দোলনী বিদ্যুৎক্ষরণ :—১-১১ঘ (১) অনুচ্ছেদে ধারক থেকে আবেশকের মধ্যে দিয়ে দোলনী বিদ্যুৎক্ষরণের কথা আলোচনা করেছি—সেখানে ক্ষরণ বা মোক্ষণের অবকল সমীকরণ $L\ddot{Q}+Q/C=0$

চিত্র 2.5(a)—L-C-R বর্তনী

কিন্তু বাস্তব আবেশকমাত্রেরই অল্পবিস্তর বৈদ্যুতিক রোধ থাকে ; সেই রোধ (r) আবেশক (l) এবং ধারক (c) শ্রেণী সজ্জায় [2.5(a) চিত্র] থাকে। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে রোধের আচরণ যান্ত্রিক ক্ষেত্রে ঘর্ষণের সামিল। কাজেই মোক্ষণকালে আবেশক অংশে ধারকের স্থির বৈদ্যুতিক শক্তির কিছুটা চৌম্বকশক্তিতে রূপান্তরিত হয় (1.17 চিত্র দেখ) আর বাকিটা রোধকে

তাপশক্তি রূপে অপচিত হয়। বিদ্যুৎধারা যেদিকেই যাক্ না কেন, জুলের তাপনসূত্রানুসারে $(H=i^2Rt/J)$-তাপ সব সময়েই উৎপন্ন হয়। কাজেই আমরা লিখতে পারি ওহ্‌ম্ সূত্রানুযায়ী রোধকের দুই প্রান্তে বিভবভেদ

$V_0 - L\dot{I} = RI$ বা $-Q/C - L\ddot{Q} = R\dot{Q}$ [বিদ্যুৎমোক্ষণে ধারকে Q কমে বলে V_0 ঋণাত্মক]

অর্থাৎ $$L\ddot{Q}+R\dot{Q}+Q/C=0 \qquad (২\text{-}৭.২)$$

চিত্র 2.5(*b*)—*L-C-R* বর্তনীতে দোলনী ও দোলহীন বিদ্যুৎক্ষরণ

এর সমাধানে আমরা ক্ষয়িষ্ণুবিস্তার বিদ্যুৎক্ষরণ পাই। 2.5(*b*) চিত্রের 3 চিহ্নিত রেখা সেই দোলনী বিদ্যুৎক্ষরণের রূপরেখা ; তার 1 ও 2 চিহ্নিত রেখার দোলহীন ক্ষরণে ধারকে সময়ের সঙ্গে আধানের পরিমাণে পরিবর্তন দেখান হয়েছে ; তারা যথাক্রমে অতিমন্দিত এবং ক্রান্তিক ক্ষরণ। এই প্রসঙ্গে 2.6 চিত্র এবং ২-৮ অনুচ্ছেদ দেখ।

প্রশ্নমালা

১। কোন বিন্দু থেকে কণার সরণ হলে তার ওপর সরণানুপাতী বল সেই বিন্দু অভিমুখে ক্রিয়া করে ; মাধ্যম কণাবেগের সমানুপাতিক বাধাবল কণার ওপর প্রয়োগ করে। কণার গতির সমীকরণ লেখ, সমাধান কর এবং বিস্তারিত আলোচনা দাও।

২। স্ববশ দোলন কি ? দমন বল কিভাবে দোলনকে প্রভাবিত করে ?

৩। একটি স্থির কণাকে ঘাত-প্রয়োগে দোলালে এবং তার ওপরে সরণানুপাতী প্রত্যানয়ক বল এবং বেগ-আনুপাতিক বাধাবল সদাই সক্রিয় থাকলে যেকোন নিমেষে তার সরণ কত ?

দমন বল ক্রান্তিক মানের ($r = \sqrt{4sm}$) সমান হলে, দেখাও যে কোন নিমেষে সরণ অবম-মান।

৪। একটি তেলের ফোঁটাকে ঊর্ধ্বমুখী বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে এমন প্রাবল্যে রাখা সম্ভব যে, সে বৈদ্যুতিক প্রাবল্য (E) এবং অভিকর্ষের যুক্ত ক্রিয়ায় সমবেগে নিচে নামে ; তাকে প্রান্তিক বেগ বলে। তেলের ফোঁটায় q পরিমাণ আধান থাকলে এবং তার ভর m হলে দেখাও যে তার পড়ার প্রান্তিক বেগের মান

$$v_{ter} = \frac{q}{m}\tau E + g\tau \; [\, \tau = m/r \,]$$

[সংকেত : $v = A + Be^{-at}$ ধরে নাও। এবার A, B এবং a-র মান বার ক'রে $t = 0$ এবং $t = \infty$ সময়ে v-র মান বার কর]

E ($= 840V$) এবং g বিষমমুখী হলে যদি 2×10^{-12} গ্রাম ভরের ফোঁটার প্রান্তিক বেগ 0.01 সেমি/সে হয় তাহলে শ্লথন কাল কত ?

[উঃ 5×10^{-6} সে]

৫। 2 গ্রাম ভরের কণাকে মধ্যক-অবস্থান থেকে 1 সেমি সরালে প্রত্যানয়ক বল 6.66 ডাইন এবং একক বেগে দমন-বল 0.8 ডাইন হয়। 4 সেমি আদি সরণ দিয়ে গতি সুরু করলে তার যে দোলন হবে তা দেখাও। কণার শ্লথন-কাল এবং তার স্পন্দনের ক্ষয়ধ্রুবক কত ? 10 সে পরে তার সরণ কত ?

উঃ $\omega_0{}^2 = 3.33,\ k = 0.25 \quad \therefore \quad \omega > k\ ;\ \tau = 2\frac{1}{2}$ সে

$k = \frac{2}{8}.\ x = 4\cos 18^\circ + 0.05\sin 18^\circ$

যদি কণাটিকে ঘাত দিয়ে সচল করা হয় তাহলে মধ্যক অবস্থানের দুধারে ক্রমিক সরণবিস্তার জানা থাকলে তার ঘাতজনিত বেগ কি ক'রে বার করা যাবে ?

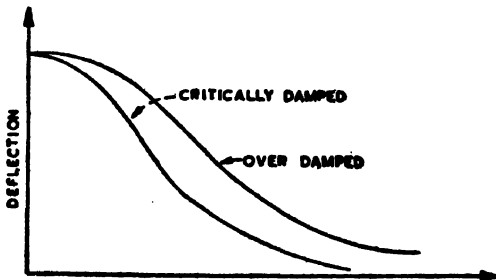
৬। আদি বেগ ($\dot{x}_0$) এবং আদি সরণ (x_0) দিয়ে মন্দিত দোলন সুরু হলে দুইক্ষেত্রে গতির সমীকরণ কি হবে ? সেই সেই ক্ষেত্রে নিমেষ-বেগের মানই বা কি কি ?

৭। একটি গ্যালভ্যানোমিটার কুণ্ডলীর পর্যায়কাল 5 সে ; তার ক্রমিক সরণবিস্তার 76, 34.2, 15.5 এবং 6.9 সেমি হলে, বাধাবল কি বেগের সমানুপাতিক ? তাই হলে, যদি কুণ্ডলীর জাড্য-ভ্রামক 4.86 গ্রাম-সেমি^{2} হয় তাহলে তাকে এক রেডিয়ান ঘোরাতে দ্বন্দ্বভ্রামক কত হয় ? একক কৌণিক বেগে দমন দ্বন্দ্বই বা কত ? [উঃ হ্যাঁ, 8.17 ডাইন-সেমি, 3.10]

৮। মন্দিত দোলকের ভর 1 কেজি, প্রত্যানয়ক বল 1 নিউটন/মি ; 1 মি/সে বেগ সঞ্চার ক'রে তাকে সচল করলে, দেখাও যে সে 1 সে পরে প্রথমবার থামবে এবং ঐ সময় বেগ-নিরপেক্ষ।

পরিশিষ্ট

২-৮. দোলহীন গতি :

স্পন্দনক্ষম কণার ওপর প্রত্যানয়ক বলের ক্রিয়ায় তার সরল দোলন হয় ; তার ওপরে বাধাবল থাকলে আর যদি **বাধাবল প্রত্যানয়ক বলের চেয়ে কম হয়** তবে মন্দিত দোলন হয়। যদি বাধাবল প্রত্যানয়ক বলের সমান বা তার বেশী হয় তাহলে দোলন মোটেই হয় না, গতি দোলহীন হয়। প্রথম সর্তাধীনে গতি **ক্রান্তিক**—মধ্যক অবস্থান থেকে বিচ্যুত কণা সবচেয়ে তাড়াতাড়ি মধ্যক অবস্থানের কাছে ফিরে আসে এবং সেখানেই থেমে যায়। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে গতি **অতিমন্দিত,** বিচ্যুত কণা ধীরে ধীরে ফিরতে থাকে, যতই মধ্যক অবস্থানের কাছে আসে ততই বেগ সূচকীয় হারে

চিত্র 2.6—দোলহীন গতি

কমে কমে যায়, তাত্ত্বিকমতে মধ্যক অবস্থানে পৌঁছতে কণার লাগে অনন্ত অবসর (2.6 চিত্র দেখ)।

এইসব তথ্য প্রতিষ্ঠা করতে আমরা ২-২.২ সমীকরণকে একটু অন্যভাবে সমাধান করব। এক্ষেত্রে **পরীক্ষণ সমাধান** ধরা হবে

$$x = Ce^{mt} \text{ তাহলে } \dot{x} = mCe^{mt} \text{ আর } \ddot{x} = m^2Ce^{mt}$$

তখন $\ddot{x} + 2k\dot{x} + \omega_0^2 x = e^{mt}(m^2 + 2km + \omega_0^2) = 0$ হবে।
এখন, যেহেতু সময়ের সব মানে $e^{mt} \neq 0$, আমরা পাচ্ছি

$$m^2 + 2km + \omega_0^2 = 0 \text{ এবং } m = -k \pm \sqrt{k^2 - \omega_0^2}$$

* তাহলে অবকল সমীকরণের পূর্ণ সমাধান দাঁড়াবে

$$x = Ae^{mt} + Be^{-mt} = Ae^{(k+\sqrt{k^2-\omega_0^2})t} + Be^{(-k-\sqrt{k^2-\omega_0^2}).t} \quad (২\text{-}৮.১)$$

$$= e^{-kt}[Ae^{\sqrt{-k^2-\omega_0}\,t} + Be^{-\sqrt{k^2-\omega_0^2}.t}] \quad (২\text{-}৮.২)$$

সমাধানের প্রকৃত রূপ k এবং ω_0র তুলনামূলক মানের ওপর নির্ভর করে—তারা যথাক্রমে (ক) $k > \omega_0$, (খ) $k = \omega_0$ (গ) $k < \omega_0$; কেবল তৃতীয় ঘটনাটিই আমরা ২.২ অনুচ্ছেদে বিশ্লেষণ করেছি। এখন অন্য দুটিও করব।

(ক) $k > \omega_0$: এই সর্তাধীনে $r > \sqrt{4sm}$, অর্থাৎ বাধাবল প্রত্যানয়ক বলের চেয়ে শক্তিশালী। তখন ২-৮.২ সমাধান কার্যকরী। e^{-kt} রাশিটির ক্রিয়ায় সময় বাড়ার সঙ্গে সরণ কমে যেতে থাকে এবং দীর্ঘকাল পরে থেমে যায়। এই গতিকে **দোলহীন** (aperiodic) বা **অতিমন্দিত** (overdamped) বলে। গতি দোলহীন ও দীর্ঘস্থায়ী ব'লে স্বনবিদ্যায় এর কোন ভূমিকা নেই। ২-৮.২ সমাধানে দুই ধ্রুবক A এবং B-র মান, আদি সরণ এবং আদি বেগ থেকে মেলে।

$$\text{ধরা যাক } x = Ae^{mt} + Be^{-mt} = Ae^{p_1 t} + Be^{p_2 t} \quad (২\text{-}৮.৩)$$

$$\text{তাহলে } \dot{x} = p_1Ae^{p_1 t} + p_2Be^{p_2 t} \quad (২\text{-}৮.৪)$$

এখন

$$t = 0 \text{ মুহূর্তে } x_0 = A + B \quad [\text{ ২-৮.৩ থেকে }]$$

$$\dot{x}_0 = p_1A + p_2B \quad [\text{ ২-৮.৪ থেকে }]$$

এদের সমাধান বজ্র-গুণন পদ্ধতিতে (determinants) করলে পাব

$$A=\frac{\begin{vmatrix} x_0 & 1 \\ \dot{x}_0 & p_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ p_1 & p_2 \end{vmatrix}}=\frac{p_2x_0-\dot{x}_0}{p_2-p_1} \text{ এবং } B=\frac{\begin{vmatrix} & \dot{x}_0 \\ & \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ p_1 & p_1 \end{vmatrix}}=\frac{\dot{x}_0-x_0p_1}{p_2-p_1}$$

$$\text{অতএব } x=\frac{p_2x_0-\dot{x}_0}{p_2-p_1}e^{(-k+\sqrt{k^2-\omega_0^2})t}$$

$$+\frac{\dot{x}_0-p_1x_0}{p_2-p_1}e^{(-k-\sqrt{k^2-\omega_0^2})t} \qquad \text{(২-৮.৫)}$$

(খ) $k=\omega_0$; **ক্রান্তিক দোলন :** এই সর্তাধীনে ($r=\sqrt{4sm}$) বাধাবল ও প্রত্যানয়ক বল সমান। ২-৮.২ সমীকরণে সরাসরি $k=\omega_0$ ধরলে সমাধান আসে না ; তাই $k^2-\omega_0^2=0$ না ধরে $k^2-\omega^2=\lambda^2$ ধরা হয়, λ বেশ ছোট রাশি। তাহলে

$$x=e^{-kt}[Ae^{\lambda t}+Be^{-\lambda t}]=e^{-kt}[A(1+\lambda t)+B(1-\lambda t)]$$ [ক্ষুদ্র রাশি $e^{\lambda t}$-র সূচকীয় প্রসারণ ধ'রে]

$$=e^{-kt}[(A-B)\lambda t+(A+B)]=e^{-kt}(Ct+D) \qquad \text{(২-৮.৬)}$$

বিকল্প সমাধান—২-২.৪ সমীকরণে $k^2=\omega_0^2$ বসালে $\ddot{f}(t)=0$। দুবার সমাকলন করলে $f(t)=Ct+D$; C এবং D সমাকলন ধ্রুবক। তাহলে $x=f(t)e^{-kt}=(Ct+D)e^{-kt}$

২-৮.৬ সমাধান-শাসিত স্পন্দনকে **ক্রান্তিক-মন্দিত** (Critically damped) গতি বলে।

C ও D ধ্রুবকের মান আগের মতোই প্রান্তিক সর্ত থেকে মেলে। এখন

$x=(Ct+D)e^{-kt}$ এবং $\dot{x}=-k(Ct+D)e^{-kt}+Ce^{-kt}$

তাহলে $t=0$ নিয়েযে, $x_0=D$ এবং $\dot{x}_0=C-kD$

তবে $C=\dot{x}_0+kD=\dot{x}_0+kx_0=\dot{x}_0+\omega_0x_0$

$$\therefore \quad x=e^{-\omega_0 t}[x_0+(\dot{x}_0+\omega_0x_0)t] \qquad \text{(২-৮.৬ক)}$$

প্রাথমিক সরণের বদলে প্রাথমিক বেগ দিয়ে ক্রান্তিক গতি সুরু করলে

$x_0=0$ এবং

$x=\dot{x}_0te^{-\omega_0 t}$ এবং $\dot{x}=\dot{x}_0e^{-\omega_0 t}(1-\omega_0t)$

পাই। সুতরাং যখন $\dot{x}=0$ অর্থাৎ $(1-\omega_0 t)=0$ হলে $t=1/\omega_0$ অবসর পরে বিচলিত কণা থামে। তখন বিচলন সর্বাধিক $x_{max}=\dot{x}/\omega_0 e$ এবং মধ্যক অবস্থানে $(x=0)$ ফিরতে কণার সবচেয়ে কম সময় লাগবে।

এই গতিও দোলহীন ; তবে একে ক্রান্তিক বলা হয়, কেননা বিচলনের পরে কণা তার মধ্যক অবস্থানের দিকে সর্বাধিক দ্রুতগতিতে ফিরে আসে এবং মধ্যক অবস্থান অতিক্রম করে না।

(গ) $k<\omega_0$; **মন্দিত দোলন :** এই সর্তাধীনে $r<\sqrt{4sm}$ অর্থাৎ বাধাবল প্রত্যানয়ক বলের চেয়ে কম। এই ক্ষেত্রেই দোলন সম্ভব এবং সে দোলন মন্দিত হবে। এই সর্তে ২-৮.২ সমীকরণে $(k^2-\omega_0^2)$ রাশিটি ঋণাত্মক হবে। আমরা যদি $q^2=\omega_0^2-k^2$ ধরি (২-২.৫খ দেখ) তাহলে $\sqrt{k^2-\omega_0^2}=jq$ বসাতে হবে এবং ২-৮.২ সমীকরণের রূপ হবে

$$x=e^{-kt}\left[Ae^{jqt}+Be^{-jqt}\right] \qquad (২-৮.৭)$$

$$=e^{-kt}\left[A(\cos qt+j\sin qt)+B(\cos qt-j\sin qt)\right]$$

$$=e^{-kt}\left[(A+B)\cos qt+j(A-B)\sin qt\right]$$

$$=e^{-kt}\left[a\cos\varphi.\cos qt+a\sin\varphi.\sin qt\right]$$

$$=ae^{-kt}\cos(qt-\varphi) \qquad (২-৮.৮)$$

এটি আমাদের পূর্বপরিচিত ২-২.৬ক সমীকরণ। x এর চরম মান a, কেননা কোসাইন রাশির চরম মান এক। তাছাড়া আগের মতই $t=0$ মুহূর্তে আদি সরণ এবং আদি বেগ নিয়ে যাত্রা সুরু করিয়ে a এবং φ দুই ধ্রুবকের মান বার করা যায়। সেই মানগুলি হয়

$$a=\left[x_0^2+\left(\frac{\dot{x}_0+kx_0}{q}\right)^2\right]^{1/2}$$

এবং $\varphi=\cos^{-1}x_0/[x_0^2+(\dot{x}_0^2+kx_0)^2/(\omega_0^2-k^2)]]^{1/2}$

সাধারণত আদি মুহূর্তে ধাক্কা দিয়ে দোলন সুরু করা হয় অর্থাৎ $x_0=0$ এবং $t=0$; তখন $a=\dot{x}_0/q$ এবং $\cos\phi=0$ বা $\phi=\pi/2$; তাহলে গতির সমীকরণ দাঁড়ায়

$$x=\frac{\dot{x}_0 e^{-kt}}{(\omega_0^2-k^2)^{1/2}}\sin\sqrt{(\omega_0^2-k^2)}.t \qquad (২-৮.৯)$$

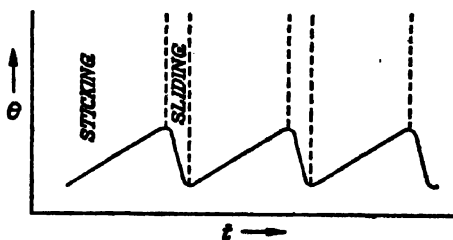
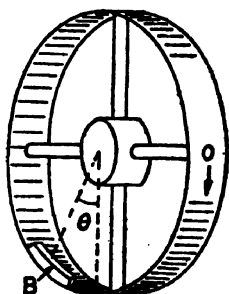
ভারী দোলকপিণ্ড যদি হাওয়ায় দোলে এবং তার দৈর্ঘ্য যদি খুব

বেশী হয়, তার দোলনকে অদমিত সরল দোলন বলা যায়। তাকে যদি জলে দুলতে দেওয়া হয় তাহলে দমন তথা বাধাবল অনেক বেশী ; কয়েকটি দোলন হয়েই এই মন্দিত দোলন থেমে যাবে। জলে উপযুক্ত পরিমাণে গ্লিসারিন মিশিয়ে মাধ্যমের সান্দ্রতা বাড়িয়ে দোলকের গতি ক্রান্তিক এবং অতিমন্দিত করা যায় ; গতি তখন দোলহীন।

ক্ষেপক গ্যালভ্যানোমিটারের কুণ্ডলীর সঙ্গে বহির্বর্তনীতে যথোপযুক্ত (CDR) রোধ R' জুড়ে তার গতি দোলহীন করা পরীক্ষাগারে একটি বহুল ব্যবহৃত পরীক্ষণ।

২-৯. শ্লথ দোলন (Relaxation Oscillation) :

এ এক বিশেষ ধরনের দোলন এবং তাতে নানারকম বিরক্তিকর এবং অবাঞ্ছিত শব্দের উৎপত্তি হয়। সচল মোটর বা বাসের ব্রেক সজোরে হঠাৎ চেপে ধরলে, শ্লেটে বা প্লেটে কঠিন ভোঁতা রড টেনে গেলে, বায়ুচালিত (pneumatic) ড্রিল দ্রুতগতিতে পাথর কাটতে থাকলে, বুকে সর্দি বসে গেলে জোরে শ্বাস টানলে, পুরোন পাম্পের হাতল ওঠানামা করলে, তৈলতৃষিত গরুরগাড়ীর বা যন্ত্রের চাকা ঘুরলে, অব্যবহৃত কব্জার জানালা-দরজা টেনে খুললে যে নানারকমের অস্বস্তিকর শব্দ আমরা শুনি, তাদের উৎপত্তি শ্লথ দোলনের জন্যই হয়।

যান্ত্রিক উদাহরণ—2.7 (a) চিত্রে একটা চওড়া কিনারার ভারী চাকা খাড়া তলে আস্তে আস্তে ঘুরছে দেখানো হয়েছে। কিনারার ভেতরের দিকে

চিত্র 2.7(a)—শ্লথ দোলনের ব্যবস্থা চিত্র 2.7 (b)—কাল-সরণ রেখা

একটা ভারী ব্লক (B) বসানো (কলকাতার রাস্তায় পুরোনো রোড-রোলার কিম্বা ক্রিকেটের মাঠে খুব ভারী রোলারের চাকার ভেতরদিকটা দেখ)। চাকা ঘুরতে থাকলে স্থিতিঘর্ষণের কল্যাণে B ওপরদিকে উঠতে থাকবে ; কিন্তু

খানিকটা ওঠার পর অভিকর্ষ বল বেড়ে স্থিতিঘর্ষণ বলের চেয়ে জোরালো হয়ে উঠবে তখন B হঠাৎ পিছলে নেমে আসে। তারপর আবার নিম্নতম বিন্দু থেকে খানিকটা ওঠে, ফের গড়িয়ে নেমে আসে। 2.7 (b) চিত্রে সময়ের সঙ্গে ব্লকটির কৌণিক অবস্থানভেদ দেখানো হয়েছে।

১২-১২ অনুচ্ছেদে আমরা দেখব যে বেহালার তারে ছড় টেনে সুরেলা শব্দ উৎপন্ন করা হয়; তার স্পন্দনরেখা 2.7 (b) চিত্রের মতোই আর উৎপত্তি অনুরূপভাবেই হয়। ১৭-৩ অনুচ্ছেদে দেখব যে আমাদের কণ্ঠস্বরের মূল উৎপত্তি, কণ্ঠনালীতে দুই কণ্ঠচ্ছদের শ্লথ-স্পন্দনেই হয়। বেতার-সম্প্রচারে এই জাতীয় স্পন্দনের বহুল ব্যবহার।

গণিতীয় বিচার : মন্দিত দোলনের থেকে শ্লথ-দোলনের রীতি-প্রকৃতি একেবারেই আলাদা। প্রথমটিতে বাধাবল বেগসাপেক্ষ এবং ধ্রুবমান। শ্লথ-দোলন এমন বাধাবলভিত্তিক যেখানে বাধা সরণের সঙ্গে বাড়তে থাকে কিন্তু একটা ক্রান্তিকমানে পৌঁছে হঠাৎ দ্রুতহারে কমে যায়, আবার অবম মান থেকে আস্তে আস্তে বেড়ে ফের দ্রুত কমে যায়—এইভাবেই পুনরাবৃত্ত হতে থাকে। সুতরাং এখানে রোধবল ঋণাত্মক ধরতে হবে এবং ২-২.১ সমীকরণের বদলে

$$m\ddot{x} = -sx + r\dot{x} \quad \text{বা} \quad \ddot{x} - (r/m)\dot{x} + (s/m)x = 0 \qquad (২\text{-}৯.১)$$

লিখতে হবে। তার সমাধান স্বভাবতই হবে $x = ae^{kt} \cos(qt - \phi')$
(২-৯.২)

অর্থাৎ বিস্তার (ae^{kt}) সময় বাড়ার সঙ্গে বেড়েই যেতে থাকবে। কিন্তু বাস্তবে বিস্তার কেবলই বাড়লে তো আর দোলন হয় না; সুতরাং x-এর কোন এক নির্দিষ্ট মান পর্যন্ত বিস্তার এবং রোধবল বাড়তে পারবে, তারপরে দ্রুতহারে দুইই কমবে (কাল-সরণ রেখা, 2.7(b) দেখ)। রোধবল সরণ সাপেক্ষ ধরে ২-৯.১-কে সংশোধন করলে লেখা যাবে

$$\ddot{x} - 2k(1 - x^2)\dot{x} + \omega_0{}^2 x = 0 \qquad (২\text{-}৯.৩)$$

এই সংশোধনের অর্থ, যে মোট রোধ, সরণ এবং বেগ দুইয়ের ওপরেই নির্ভর করে। k ধনাত্মক হলে অল্প সরণে বাধা ঋণাত্মক হবে, ফলে মধ্যক অবস্থানে দোলকের অবস্থা অস্থিত (unstable); আবার $k^2 \geqslant \omega^2$ হলে যতক্ষণ $x^2 \leqslant 1$ হবে, ততক্ষণ সরণ দোলহীনভাবে বেড়েই যাবে। কিন্তু সরণ বাড়তে বাড়তে $x^2 > 1$ হলে ২-৯.৩-তে বাধা ধনাত্মক হবে এবং

x ক'মে শূন্যমুখী হবে। বিজ্ঞানী Pohl দেখিয়েছেন যে ২-৯.৩ সমীকরণ শাসিত স্পন্দনের পর্যায়কাল T_B হবে

$$T_B = 1{\cdot}61(r/s) = 1{\cdot}61\ (2k/\omega_0{}^2) \qquad (২\text{-}৯.৪)$$

অর্থাৎ পর্যায়কাল রোধ এবং দার্ঢ্য দুই বলের অনুপাত-নির্ভর।

বৈদ্যুতিক শ্লথন-মোক্ষণ : একটি ধারকের (C) সমান্তরালে একটি নিয়নবাতি ও আবেশক জুড়ে তাকে যদি কোন বৈদ্যুতিক উৎসের সঙ্গে যোগ করা হয় তাহলে $T = 1{\cdot}61CR$ সময় পরপর নিয়নবাতি জ্বলে উঠতে দেখা যায়। R এখানে বিদ্যুৎ-উৎসের সঙ্গে শ্রেণীতে যুক্ত উচ্চমানের রোধ। এই দোলন ব্যবস্থায় $2k = R/L$ এবং $\omega_0{}^2 = 1/LC$ নেওয়া হয়। 2.8 চিত্রে ক্যাথোডরশ্মি দোলনলিখ যন্ত্রের (১০-৯-ক অনুচ্ছেদ) মুদ্রিত নিয়নবাতির প্রান্তীয় বিভবভেদ-কাল রেখা দেখানো হয়েছে। মনে রাখা দরকার যে নিয়নবাতি বিদ্যুৎমোক্ষণ নল; বিদ্যুৎমোক্ষণে প্রবাহ যত

চিত্র 2.8—নিয়নবাতিতে শ্লথন-দীপন

বাড়ে রোধ তত কমে। সুতরাং এক্ষেত্রে রোধ ঋণাত্মক (এই কারণেই ফ্লুরেসেণ্ট বাতির বর্তনীতে আলাদা রোধ লাগিয়ে বিদ্যুৎপ্রবাহ সীমিত রাখা হয়)। অতএব নিয়নবাতির সান্তর (intermittent) দীপন শ্লথন-দোলনের বৈদ্যুতিক উদাহরণ।

শ্লথন-দোলনের বৈশিষ্ট্য : (ক) পর্যায়কাল, বাধা এবং দার্ঢ্যধর্মের ওপর নির্ভর করে।

(খ) তরঙ্গরূপ সরল দোলীয় রূপ থেকে অনেক আলাদা। যতক্ষণ বাধাবল অক্রিয় ততক্ষণ সরণ-হ্রাস দ্রুতহারে হয়, কাল-সরণ রেখা তুলনায় বেশ খাড়া হয়। তাই উৎপন্ন শব্দে অনেকগুলি জোরালো উপসুর থাকে।

(গ) শ্লথন-দোলনক্ষম তন্ত্রে দুর্বল পর্যাবৃত্ত বল প্রয়োগ করলে অস্থিত অবস্থার জন্যে স্বয়ংক্রিয় সমলয়ে (automatic synchronisation) দোলন ঘটতে থাকে।

৩

পরবশ দোলন

৩-১. পরবশ দোলন ও অনুনাদ :

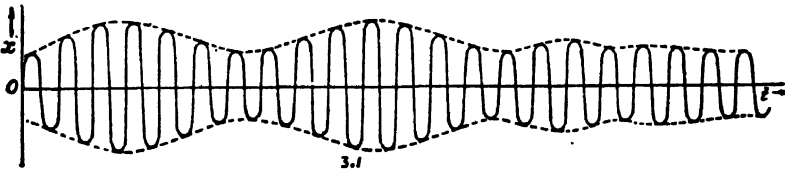
দোলনক্ষম সংস্থাকে আদি সরণ বা ঘাত প্রয়োগে স্থির অবস্থা থেকে সরিয়ে ছেড়ে দিলে তার মন্দিত দোলন হতে থাকবে ; কালক্রমে সে থেমে যাবে। শিশু-উদ্যানে ছোটদের দোলনার দোলনকথা ভাব। গোড়ায় যে শক্তি সঞ্চার করা হয়েছিল সেই শক্তি অপচয় হতে হতে একসময় ফুরিয়ে যাবে। স্পন্দন চালু রাখতে তাই স্পন্দকে নিয়মিতহারে শক্তি যোগাতে হবে ; সেজন্যে নির্দিষ্ট অবসর পর পর বাইরে থেকে বল প্রয়োগের দরকার। খেয়াল কর যে, শিশুর দোলনা দুলন্ত রাখতে হলে সে দোলনপ্রান্তে এলে তাকে ধাক্কা দিতে হয় ; এক সপ্তাহ পরপর বাড়ীর দেয়ালঘড়িতে দম দিতে লাগে। স্পন্দকের দোলন অক্ষুণ্ণ রাখতে পর্যাবৃত্ত বাহ্য বল প্রয়োগ করা চাই। ঘাত বল প্রয়োগে স্পন্দকের স্বকীয় কম্পাংকে স্ববশ দোলন ঘটে আর পর্যাবৃত্ত বলের ক্রিয়ায়, সমলয়ে পরবশ দোলন। দোলনের গোড়ায় দুয়ের সমাপতনে অনিয়মিত স্পন্দন হবে (3.1 চিত্র) ; কালক্রমে স্বভাবী বা স্ববশ কম্পন দমিত হতে হতে থেমে যাবে এবং বাহ্যবলশাসিত নিয়মিত স্পন্দন পূর্ণমাত্রায় প্রতিষ্ঠিত হবে। পর্যাবৃত্ত বাহ্যবলের ক্রিয়ায় কোন স্পন্দকের অল্পবিস্তার, সমকাল এবং নিয়মিত স্পন্দনকে **পরবশ** বা **শাসিত** (forced) **স্পন্দন** বলে।

স্পন্দকের এবং শাসক বলের স্পন্দনাংক (ω) সমান হলে সময়ের সঙ্গে স্পন্দনবিস্তার দ্রুতহারে বাড়তে থাকে ; বাধা, বেগের সমানুপাতিক ব'লে সেও সমান হারে বাড়তে থাকে। শেষ পর্যন্ত যখন যোগান শক্তির সবটাই বাধাকে নিষ্ক্রিয় করতেই ফুরিয়ে যায় তখন নিউটনের প্রথম গতিসূত্রবশে স্পন্দন নিয়মিত হতে থাকে ; সেই স্পন্দন প্রশস্তবিস্তার তথা **অনুনাদী**। শাসিত বা পরবশ দোলনে (*i*) চালক বল আর চালিত স্পন্দকের অদমিত স্পন্দনাংক সমান হলে (*ii*) যখন দোলন বা স্পন্দন প্রশস্তবিস্তার হয়, তখন **অনুনাদ** ঘটছে বলা হয়। এইজাতীয় স্পন্দনকে সমবেদী (sympathetic) স্পন্দনও বলে। স্পন্দনে বাধা না থাকলে বিস্তার অসীম হ'ত কিন্তু বাস্তবে দমন বল সর্বদাই থাকে ব'লে স্পন্দন মোটামুটি সীমিতবিস্তার থাকে।

এখন পরবশ দোলন ঘটতে হলে শাসক ও শাসিত তথা চালক ও চালিত দুই সংস্থার মধ্যে কোনরকম যোগসূত্র থাকা চাই। যেমন কণ্ঠ- বা যন্ত্র-সঙ্গীতে উৎস (স্বনক) এবং গ্রাহকের (কানের পর্দা) মধ্যে যোগসূত্র রচনা করে শব্দতরঙ্গ। আবার সেই শব্দ যদি মাইক্রোফোনের পর্দায় পড়ে তাহলে বিদ্যুৎপ্রবাহভেদ উদ্ভূত হয় আর সেই বিদ্যুৎপ্রবাহ লাউডস্পীকারকে সচল ক'রে শব্দ উৎপন্ন করে ; এখানে মাইক্রোফোনের পর্দা গ্রাহক, লাউডস্পীকারের পর্দা স্বনক ; এখানে গলা ও অ্যাম্‌প্লিফায়ারকে চালক বা শাসক-সংস্থা এবং কানের পর্দা বা মাইক্রোফোন পর্দাকে গ্রাহক বা শাসিত স্পন্দক বলা যায়। চালকের কাছ থেকে শক্তির যোগান পেয়ে গ্রাহক সংস্থা স্পন্দিত হতে থাকে।

স্বনবিদ্যায় পরবশ স্পন্দন এবং অনুনাদের ভূমিকা বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। কারণ অধিকাংশ স্বনকেরই শব্দের জোর বাড়াতে অনুনাদ কাজে লাগানো হয়।

নিউটনের তৃতীয় সূত্রের দরুন গ্রাহকসংস্থা থেকে চালকসংস্থাতে শক্তি ফেরত যাওয়ার কথা—অনেক ক্ষেত্রে তা যায়ও। তখন সংস্থা দুটির মধ্যে পর্যায়ক্রমে ভূমিকার পালাবদল হতে থাকে। সেই স্পন্দনকে **যুগ্ম স্পন্দন** বলে। পরের অধ্যায়ে তার আলোচনা হবে। পরবশ কম্পন, যুগ্ম স্পন্দনের এক বিশেষ রূপ, এখানে দুই স্পন্দক সংস্থার মধ্যে শক্তির প্রবাহ একমুখী, প্রত্যাবর্তী নয় ; তার জন্যে দুটি সর্তের যেকোন একটি পূর্ণ হওয়া চাই—(*i*) দুই সংস্থার মধ্যে মধ্যে যোগসূত্র অতি ক্ষীণ বা (*ii*) চালকসংস্থায় সঞ্চিত শক্তি এত বেশী যে, সে তুলনায় গ্রাহক থেকে প্রত্যার্পিত শক্তি নগণ্য। পরবশ দোলনের আলোচিত উদাহরণ দুটির প্রথমটি প্রথম সর্ত আর দ্বিতীয়টি পরের সর্ত মেনে চলে।

পরবশ দোলনের বৈশিষ্ট্য ঃ (*i*) স্পন্দকের ওপর পর্যাবৃত্ত বল প্রযুক্ত

চিত্র 3.1—অচির স্পন্দন

হলেই তবে পরবশ দোলন সম্ভব। (*ii*) পরবশ স্পন্দনের সুরুতে স্পন্দকের এবং চালকের দুয়ের স্বকীয় কম্পাংকেই একযোগে স্পন্দন হয়। দুই কম্পাংক

কাছাকাছি হলে স্বরকম্পের (beats ; 3.1 চিত্র) উৎপত্তি হতে পারে। দমন যত দুর্বল হয় স্বরকম্প তথা স্ববশ ও পরবশ কম্পনের যৌথ স্পন্দন ততই দীর্ঘস্থায়ী হয় (চিত্রে তিনটি মাত্র দেখানো হয়েছে)। প্রাথমিক এই অনিয়মিত স্পন্দনকে **অচির** বা অস্থেয় (transient) বলে ; কারণ কালক্রমে এই স্পন্দন লোপ পায়। শব্দের আরম্ভে আর শেষেই কেবল অচির স্পন্দন দেখা যায় ; L-C-R বর্তনীতে স্থির বিদ্যুৎধারার ক্রমবৃদ্ধি বা হ্রাস, এই ঘটনারই বৈদ্যুতিক উদাহরণ। অচির স্পন্দনের জন্যেই বাজনাতে সুরজাতির (quality) সুস্পষ্ট তারতম্য ঘটে। ঢাক, ঢোল বাঁয়া-তবলা প্রভৃতি সংঘট্ট (percussion) বাদ্যযন্ত্রের শব্দবৈশিষ্ট্যের জন্যে এইজাতীয় স্পন্দনই দায়ী। নিয়মিত পরবশ কম্পনে স্পন্দনাংক চালক স্পন্দনাংকের সমান, অচির স্পন্দনাংকের কোন প্রভাবই থাকে না—যেন স্পন্দক তার দোলনারম্ভের স্মৃতি হারিয়ে ফেলেছে। (*iii*) নিয়মিত পরবশ কম্পনকালে স্পন্দক চালকের কম্পাংককে কম্পিত হতে বাধ্য হয়। (*iv*) পরবশ কম্পনে স্পন্দনবিস্তার সাধারণত কমই হয়। তবে অনুনাদের বেলায় বিস্তার বেশী। বিস্তারমাত্রা দমনসাপেক্ষ—দমন বেশী হলে বিস্তার কম হয়।

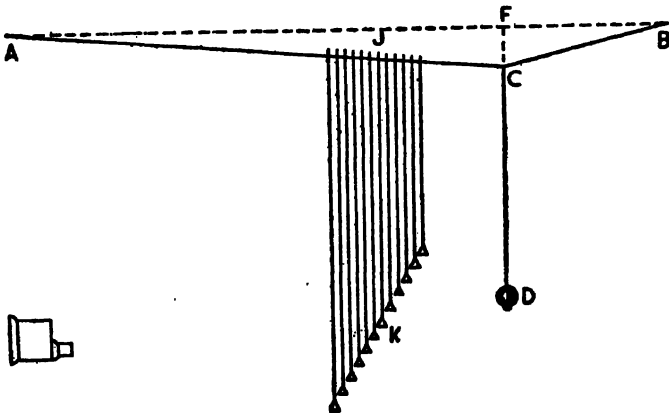
স্ববশ ও পরবশ স্পন্দনের তুলনা :

স্ববশ দোলন	পরবশ দোলন
(১) কম্পাংক ভর এবং দার্ঢ্য-নিয়ন্ত্রিত, দুয়ের অনুপাত ($\sqrt{m/s}$)-নির্ভর এবং বাহ্যবল নিরপেক্ষ।	(১) সম্পূর্ণভাবে বাহ্য পর্যাবৃত্ত বলশাসিত। কম্পাংক বাহ্যবলের কম্পাংকের সমান।
(২) দমনবলের ক্রিয়ায় অল্পাধিক সময় পরে থেমে যায়।	(২) বাহ্যবল যতক্ষণ সক্রিয় স্পন্দনও ততক্ষণ থাকে।
(৩) স্পন্দনবিস্তার প্রাথমিক শক্তির যোগানের ওপর নির্ভর করে। দমনের ক্রিয়ায় বিস্তার সূচকীয় হারে কমতে থাকে, শেষ পর্যন্ত থেমেই যায়।	(৩) সাধারণভাবে স্পন্দনবিস্তার কমই হয়। তবে স্পন্দক-কম্পাংক চালক কম্পাংকের কাছাকাছি হলে বিস্তার দ্রুতহারে বাড়তে থাকে ; দুই কম্পাংক সমান হলে বিস্তার সম্ভবপর চূড়ান্তমান হয়। এখানেও বিস্তার দমনবল-নির্ভর।

অনুনাদ : পরবশ কম্পনে স্পন্দকের স্পন্দনবিস্তার সম্ভবপর চরমমান হলে তাকে **বিস্তার-অনুনাদ**, আর শক্তি সর্বাধিক হলে বেগ বা **শক্তি-**

অনুনাদ বলে। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে চালক থেকে গ্রাহকে সর্বাধিক শক্তির হস্তান্তর ঘটে। খুব দুর্বল মন্দনে দুই অনুনাদই স্পন্দকের অদমিত স্পন্দনাংকে হয়। বেশী মন্দনে দুই অনুনাদ কাছাকাছি কিন্তু ভিন্ন কম্পাংকে ঘটে। দুয়ের মধ্যে তুলনায় শক্তি-অনুনাদই বেশী গুরুত্বপূর্ণ।

৩-২. পরবশ দোলন ও অনুনাদের প্রদর্শনী পরীক্ষা:

ক. যান্ত্রিক অনুনাদ: তিন-চার মিটার লম্বা একটা শক্ত রবারের রশি (AB, 3.2 চিত্র) দুই প্রান্ত শক্ত ক'রে আটকে তার C বিন্দু থেকে একটা ধাতুর রড CD ঝোলানো হয়; D প্রান্তে একটি লোহার গোলক থাকে —একটি প্যাঁচের সাহায্যে ঘড়ির পেণ্ডুলামের মতো তাকে ওঠানামা করিয়ে দোলকের কার্যকরী দৈর্ঘ্য বাড়ানো-কমানো যায়। CD-র বাঁয়ে ভিন্ন ভিন্ন দৈর্ঘ্যের অনেকগুলি দোলক থাকে; তাদের নিচের প্রান্তে কিন্তু দোলকপিণ্ডের বদলে কাগজের শংকু থাকে। CD-র দৈর্ঘ্য মোটামুটিভাবে এদের গড় দৈর্ঘ্যের সমান। কাগজের শংকুগুলি খুবই হাল্‌কা, সুতরাং তাদের দোলন হাওয়ার বাধায় চটপট থেমে যায়। শংকুগুলির ওপরে ছোট ছোট পিতলের কাটা-আংটা চড়িয়ে এদের ভারাক্রান্ত করলে তাদের দোলন দীর্ঘস্থায়ী হয়। এদের **বার্টনের দোলক** বলে। কাগজের শংকুর বদলে পিংপং বলও ঝোলানো যেতে পারে।

চিত্র 3.2—বার্টনের দোলক

এখন D-কে দুলিয়ে দিলে তার ভার বেশী ব'লে দোলন দীর্ঘস্থায়ী হয়। CD রশির আড়াআড়ি দিকে দুলিয়ে দিলে অন্য দোলকগুলিও রশির মাধ্যমে

শক্তিসংগ্রহ ক'রে নিয়ে দুলতে সুরু করে—অর্থাৎ তাদের দোলন পরবশ। এদের দোলন সুষ্ঠুভাবে নিরীক্ষণ করার জন্য বাঁ দিকে বড় জোরালো দীপক আর ডাইনে ছায়াগ্রাহী পর্দা রাখা থাকে। CD দোলকটি চালক—তার দোলন অন্য দোলকগুলিতে সংক্রামিত হয়। দেখা যায়, CD-র সমদৈর্ঘ্য শংকুদোলকটি খুব তাড়াতাড়িই দোলন তুলে নেয় এবং তার দোলনবিস্তারও যথেষ্ট বেশী; অন্যদের দৈর্ঘ্য আলাদা ব'লে তাদের কম্পাংক ভিন্ন ($n \propto 1/\sqrt{l}$) হবে। তারা প্রথমে খানিকক্ষণ অনিয়মিতভাবে দোলে (আংটা পরানো থাকলে

(a) (b)

চিত্র 3.3—ভিন্ন ভিন্ন বাধাবলে বার্টনের দোলকগুলির স্পন্দনবিস্তার

অনিয়মিত দোলন বেশী সময় ধরে চলে। কেন ?), পরে দোলন নিয়মিত হয়ে যায়; তখন সব দোলকেরই পর্যায়কাল সমান। 3.3(a) চিত্রে আংটা-পরানো দোলকগুলির স্পন্দন-বিস্তার দেখান হয়েছে; অনুনাদী তথা সমদৈর্ঘ্যের দোলকের স্পন্দনবিস্তার অন্যগুলির চেয়ে ঢের বেশী; এদের স্পন্দনবিস্তার কাছাকাছি কিন্তু পরস্পর অসমান। 3.3(b) চিত্রে আংটাহীন দোলকগুলির স্পন্দনবিস্তার দেখানো হয়েছে; এক্ষেত্রে বাধাবল আনুপাতিকভাবে বেশী, তাই বিস্তারভেদ আগের মতো অত স্পষ্ট নয়, —এখানেও মাঝের ছায়াচিত্রটি অনুনাদী দোলনবিস্তার নির্দেশ করছে।

চিত্র 3.4—সুরশলাকার পরবশ স্পন্দন

খ. শাব্দ অনুনাদ—3.4 চিত্রে খাড়াভাবে শক্ত ক'রে বসানো একটি বিদ্যুৎচুম্বক-উদ্দীপিত এক সুরশলাকা দেখানো হয়েছে। বিদ্যুৎচুম্বকের তারের মধ্যে দিয়ে নিয়ন্ত্রিত কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-প্রবাহ পাঠানো যায়। এই সুরশলাকাকে আঘাত করলে 256 চক্রের বিশুদ্ধ সুর শোনা যায়। এবারে তারে 280 চক্রের প্রত্যাবর্তী প্রবাহ পাঠালে প্রথমে বেসুরো

শব্দ শোনা যাবে। কারণ দুই স্পন্দনের সমাপতনে 24 কম্পাংকের স্বরকম্প উৎপন্ন হতে থাকে। তবে খানিক পরেই 280 চক্রের বিশুদ্ধ সুর শোনা যাবে। কারণ তখন সুরশলাকার নিজস্ব কম্পাংকের স্পন্দন মন্দিত হয়ে থেমে যায়, স্বরকম্প লোপ পায় এবং পরবশ কম্পন পূর্ণভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়। শব্দ কিন্তু খুব জোরে নয়।

এবারে প্রত্যাবর্তী প্রবাহ 256/সে কম্পাংকে পাঠালে শব্দ খুব জোরে হয়, কেননা সুরশলাকার বাহুগুলি অনুনাদের দরুন অনেক বেশী বিস্তারে কাঁপতে থাকে।

৩-৩. অনুনাদের সুবিধা ও অসুবিধাঘটিত ব্যবহারিক প্রয়োগ:

দৈনন্দিন জীবনে অনুনাদ বহুপরিচিত ঘটনা। শুধু শব্দের বেলায় নয়, স্পন্দন, বেতারসংকেত গ্রহণ, স্থপতিবিদ্যা, আলোর শোষণ, বিক্ষেপণ, বিচ্ছুরণ প্রভৃতি আপাতনিঃসম্পর্ক ঘটনাতে এর উপস্থিতি। ঘর্ষণের মতোই সেও আমাদের নানারকম সুবিধা, অসুবিধা ঘটায়। আমরা তাদের কয়েকটি মাত্র আলোচনা ক'রব।

তারের বাদ্যযন্ত্রে অর্থাৎ ততযন্ত্রে (যেমন—সেতার, গীটার, এস্রাজ, বীণা, বেহালা ইত্যাদি) একটা কাঠের তক্তার ওপর অনেকগুলি তার সটান বাঁধা থাকে। তক্তাটি এক বায়ুপ্রকোষ্ঠের আবরণ মাত্র। তারের স্পন্দন তক্তা আর গহ্বরস্থ বায়ুতে পরবশ কম্পন ও অনুনাদ জাগিয়ে বাজনার জোর বাড়ায়। এদের তারগুলি ভিন্ন ভিন্ন সুরে বাঁধা, ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে কাঁপে। প্রধান তারে কোন সুর বাজালে সেই সুরে বাঁধা অন্য তারে ঝংকার ওঠে—তাতে সুরের জোর এবং মিষ্টতা দুইই বাড়ে। ঢাক-ঢোল, বাঁয়া-তবলা প্রভৃতি সংঘট্ট বাদ্যযন্ত্রে, বাঁশী, ভেঁপু, শাঁখ প্রভৃতি বায়ব বাদ্যযন্ত্রে আভ্যন্তরীণ বায়ুর পরবশ কম্পন ও অনুনাদ বাজনাকে জোরালো করে। ১৭ অধ্যায়ে এদের নিয়ে আলোচনা হবে।

অসুবিধাও আছে। সস্তার লাউডস্পীকারের পর্দায় অনেক সময়ে স্বরগ্রামের কোন কোন কম্পাংকে অনুনাদ ঘটে এবং সেই সুর মাত্রাছাড়া জোরালো হয়ে ওঠে—এটা বিশেষ অবাঞ্ছিত ঘটনা। তাই লাউডস্পীকার, মাইক্রোফোন প্রভৃতিতে স্পন্দনীপর্দা এত টেনে বাঁধা হয় যাতে ঝিল্লীর স্বভাবী কম্পাংক অনেক উঁচুতে থাকে, স্বরগ্রামের কোন সুরেই অনুনাদের সম্ভাবনা থাকে না। পিয়ানো, অর্গ্যান প্রভৃতিতে ভারী সুর জোরে বাজলে মাঝে মাঝে ঘরে ধাতুর শূন্য ঘটে বা

জালার (vase) বায়ুর অনুনাদ হতে দেখা গেছে ; এতে বিভ্রান্তিও হয় আবার পটতান (background) সৃষ্টি করতেও তাদের রাখা হয়।

সৌধস্বন আলোচনাকালে (১৯ অধ্যায়) ঘরে শাব্দ অনুনাদ কেন ঘটে, কি কি অসুবিধা হয়, কিভাবে অপসারিত করা যায়, আমরা আলোচনা ক'রব। শাব্দত্রুটিযুক্ত ঘরে কোন কোন শব্দের (সস্তা লাউডস্পীকারের পর্দার মতোই) পক্ষপাতী অনুনাদ হয়ে শব্দে বিকৃতি আসে। বাড়ী, সেতু, রাস্তা তৈরী করার সময় স্থপতিদের যান্ত্রিক-অনুনাদ সম্বন্ধেও সচেতন থাকতে হয়। ট্রেন, ট্রাক, ভারী লরি বা বাস চলায় রাস্তায় যে ভূকম্পন সৃষ্টি হয় তাতে বাড়ী বা সেতুর পরবশ কম্পন হয়। এই পর্যাবৃত্ত বল দুর্বল হলেও সমকম্পাংকে জোরালো স্পন্দন ঘটাতে পারে, বাড়ী বা সেতুতে ক্ষতি, ফাটল ধরানো, এমনকি ভেঙে পড়াও অসম্ভব নয় ; সাধারণ ঝড়ে সৃষ্ট অনুনাদী স্পন্দনে, ১৯৪৪ সনে সানফ্রান্সিস্‌কো পোতাশ্রয়ে মাত্র দুমাস আগে তৈরী সেতু সমুদ্রগর্ভে ভেঙে পড়েছিল। বাড়ীর নীচতলায় ভারী যন্ত্রপাতি চলতে থাকলে বাড়ীর কাঠামোয় ফাটল ধরতে দেখা গেছে ; ভূকম্পপ্রবণ জায়গাতেও বাড়ীর এইরকম ক্ষতি হতে দেখা গেছে। তাই স্থপতিরা সম্ভবপর সক্রিয় পর্যাবৃত্ত বলের সমীক্ষা ক'রে নিয়ে এমন ঘরবাড়ী, সেতু ইত্যাদি গড়েন যার স্বাভাবিক কম্পাংক প্রযুক্ত বলগুলির কম্পাংকের অনেক বেশী বা অনেক কম।

ঠিক এই কারণেই সেতুর ওপর রেললাইন পাতার সময় আজকাল জোড়-বিহীন লাইন বসানো হয় ; কারণ রেলগাড়ীর কঠিন চাকাগুলির পর্যাবৃত্ত আঘাতে লাইনের সংযোগগুলির এবং ধারকসেতুতে জোরালো স্পন্দনের ভয় থাকে।

পুরোনো বাস বা গাড়ী অমসৃণ রাস্তায় দ্রুতগতিতে চললে নানারকমের বিরক্তিকর শব্দ করে। তাদের নানা অংশের, যথা—এঞ্জিন, ব্রেক রড, গিয়ার, লেভার প্রত্যেকেরই নিজস্ব স্পন্দনাংক আছে। গাড়ীর পিস্টনের পর্যাবৃত্ত গতি তার বেগের সঙ্গে সঙ্গে বদলায় এবং সেই সেই স্পন্দন প্রতিটি অংশের পরবশ স্পন্দন ঘটায়। বেগ বদলানোর সঙ্গে সঙ্গে এই চালক কম্পাংকও বদলাতে থাকে। সেই সেই কম্পাংক যখন যে যে অংশের স্বভাবী কম্পাংকের সঙ্গে মিলে যায় তখন সেই সেই অংশে অনুনাদ তথা জোরালো শব্দ হয়।

বেতারকেন্দ্র থেকে সম্প্রচার ধরতে রেডিওতে অনুনাদনীতি কাজে লাগানো হয়। বেতারগ্রাহকে একটি বৈদ্যুতিক দোলবর্তনী (১-১১ঘ) থাকে ; তাতে নগণ্যরোধের এক আবেশক (L) এবং ধারক (C) থাকে—তার কম্পাংক $1/2\pi\sqrt{LC}$ মানের হয়। রেডিওর চাবি বা knob ঘোরানোর সঙ্গে সঙ্গে

C-র মান পাল্টাতে থাকে। যখন বর্তনীর স্পন্দনাংক সম্প্রচারিত বেতারতরঙ্গের স্পন্দনাংকের সমান হয় তখনই তাতে অনুনাদী বৈদ্যুতিক স্পন্দন হয়। সেই স্পন্দন, সংলগ্ন লাউড-স্পীকারের পর্দাকে কাঁপিয়ে শব্দের সৃষ্টি করে। এইভাবেই অনুনাদের সাহায্যে বেতার-সংকেতগ্রহণ সম্ভব হয়; আর এই কারণেই একসময়ে একটিমাত্র কম্পাংকের বেতারসংকেত বা স্টেশন ধরা যায়।

আলোকতরঙ্গ অতিক্ষুদ্র বেতার তথা বিদ্যুচ্চুম্বকীয় তরঙ্গমালা; তাদের পর্যাবৃত্ত আঘাতে পরমাণুতে কক্ষপথে ভ্রমণরত ইলেকট্রনের পরবশ এবং যোগ্য সর্তাধীনে অনুনাদী কম্পন হয়। এই কারণেই পদার্থে আপতিত হলে আলোকশক্তির শোষণ, বিক্ষেপণ এবং বিচ্ছুরণ ঘটে। অনুনাদী স্পন্দনের ভিত্তিতেই ব্যতিক্রান্ত বিচ্ছুরণ (anomalous dispersion) সম্পর্কিত সেলেমায়ারের সমীকরণের ব্যুৎপত্তি (deduction) সম্ভব হয়েছে।

৩-৪. পরবশ কম্পনের গাণিতীয় বিশ্লেষণ:

মন্দিত দোলনে জড়তা বলকে ($m\ddot{x}$) সরণানুপাতিক প্রত্যানয়ক বল (sx) এবং বেগ-আনুপাতী বিরোধী বল ($r\dot{x}$) সদাই বাধা দিতে থাকে। প্রথমটির ক্রিয়ায় শক্তির সংরক্ষণ, দ্বিতীয়ের ফলে এর অপচয় হয়; কাজেই কালক্রমে স্পন্দক থেমে যায়। তাকে সচল রাখতে হলে পর্যাবৃত্ত বল প্রয়োগ করতে হবে। সুবিধার জন্য আমরা তাদের স্থিরবিস্তার, স্থিরকম্পাংক, সরল দোলজাতীয় বল $F\cos\omega t$ বা $F\sin\omega t$ ব'লে ধ'রব। তাদের ক্রিয়ায় যথাক্রমে x_1 এবং x_2 নিমেষ-সরণ হলে গতির সমীকরণ দাঁড়াবে যথাক্রমে

$$m\ddot{x}_1 = -r\dot{x}_1 - sx_1 + F\cos\omega t \qquad (৩\text{-}৪.১ক)$$

এবং $$m\ddot{x}_2 = -r\dot{x}_2 - sx_2 + F\sin\omega t \qquad (৩\text{-}৪.১খ)$$

নানা ভাবে এই অবকল সমীকরণের সমাধান সম্ভব। আমরা প্রথমে জটিল রাশি প্রয়োগে এবং পরে র‍্যালের পদ্ধতিতে সেই সমাধান ক'রব।

ক. জটিল রাশি প্রয়োগ: ১-১২.৬ সমীকরণে আমরা দেখেছি যে কোন জটিল রাশির বাস্তব অংশকে কোসাইন রাশি আর অলীক অংশকে সাইন রাশির আকারে প্রকাশ করা যায়। তাই আমরা ৩-৪.১(খ)র প্রতিটি রাশিকে $j(=\sqrt{-1})$ দিয়ে গুণ ক'রে তাদের অলীক রূপে এনে ৩-৪.১ (ক)-র সঙ্গে যোগ ক'রে জটিল রাশির আকারে আনবো। তাহলে

$$m(\ddot{x}_1 + j\ddot{x}_2) + r(\dot{x}_1 + j\dot{x}_2) + s(x_1 + jx_2) = F(\cos\omega t + j\sin\omega t)$$

একে জটিল রাশির আকারে প্রকাশ করলে, পাচ্ছি

$$m\ddot{x}+r\dot{x}+sx=Fe^{j\omega t}$$

বা $$\ddot{x}+2k\dot{x}+\omega_0^2x=fe^{j\omega t} \quad (৩\text{-}৪.২)$$

এখানেও $2k=r/m=1/\tau$ (শ্লথন-কাল), $s/m=\omega_0^2$ আর $f=F/m$ প্রযুক্ত ত্বরণের চরম মান। পরীক্ষণ সমাধান হিসাবে ধরা যাক

$$X=X_0e^{j\omega t} \quad (৩\text{-}৪.৩)$$

তাহলে $\dot{x}=j\omega X_0e^{j\omega t}=j\omega X$ আর $\ddot{x}=-\omega^2X_0e^{j\omega t}=-\omega^2X$; এই মানগুলি ৩-৪.২-তে বসিয়ে মিলবে

$$(-\omega^2+j\omega.2k+\omega_0^2)X_0e^{j\omega t}=fe^{j\omega t}$$

$$\therefore\quad X_0=\frac{f}{(\omega_0^2-\omega^2)+j.2k\omega}=\frac{f}{(\omega_0^2-\omega^2)+j(\omega/\tau)}$$

$$=\frac{f}{(\omega_0^2-\omega^2)+j.2k\omega}\times\frac{(\omega_0^2-\omega^2)-j.2k\omega}{(\omega_0^2-\omega^2)-j.2k\omega}$$

$$=\frac{f[(\omega_0^2-\omega^2)-j.2k\omega]}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2}$$

$$=\frac{f(\omega_0^2-\omega^2)}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2}-j\frac{f.2k\omega}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2} \quad (৩\text{-}৪.৪ক)$$

$$=\frac{fa\cos\phi}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2}-j\frac{fa\sin\phi}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2}$$

$$=\frac{fae^{-j\phi}}{a^2} \quad (৩\text{-}৪.৪খ)$$

এখানে $$a^2=(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2 \quad (৩\text{-}৪.৫ক)$$

এবং $$\tan\phi=2k\omega/(\omega_0^2-\omega^2) \quad (৩\text{-}৪.৫খ)$$

$$\therefore\quad X=X_0e^{j\omega t}=\frac{f}{a}\,e^{-j\phi}.e^{j\omega t}=\frac{fe^{j(\omega t-\phi)}}{[(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2]^{1/2}} \quad (৩\text{-}৪.৬)$$

এখন ৩-৪.৬ সমীকরণকে সরাসরি জটিল রাশির আকারে প্রকাশ করলে পাব

$$X = \mathrm{Re}(x) + \mathrm{Im}\,(x) = x_1 + jx_2$$
$$= \frac{f\,[\cos\,(\omega t - \phi) + j\,\sin\,(\omega t - \phi)]}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2]^{1/2}}$$

এবারে জটিল রাশির বাস্তব এবং অলীক রাশি, সমীকরণের দুধার থেকে সমীকৃত করলে পাব

$$x_1 = \frac{f\,\cos\,(\omega t - \phi)}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2]^{1/2}}$$
$$= \frac{f\,\cos\,(\omega t - \phi)}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2]^{1/2}} \qquad (৩\text{-}৪.৭ক)$$

এবং $x_2 = \dfrac{f\,\sin\,(\omega t - \phi)}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2]^{1/2}}$

$$= \frac{f\,\sin\,(\omega t - \phi)}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega/\tau)^2]^{1/2}} \qquad (৩\text{-}৪.৭খ)$$

তাহলে চালক পর্যাবৃত্ত বল (F) কোসাইন রাশি-নির্ভর (৩-৪.১ক) হলে সমাধান (৩-৪.৭ক) আর সাইন-নির্ভর হলে সমাধান (৩-৪.৭খ) সমীকরণ।

সমাধানগুলিতে $\omega_0^2 = s/m$, $2k = r/m$ এবং $f = F/m$ মানগুলি ফিরিয়ে আনলে

$$x_1 = \frac{(F/m)\,\cos\,(\omega t - \phi)}{[(s/m - \omega^2)^2 + (r/m)^2\omega^2]^{1/2}}$$
$$= \frac{F\,\cos\,(\omega t - \phi)}{[(s - m\omega^2)^2 + r^2\omega^2]^{1/2}} = \frac{F\,\cos\,(\omega t - \phi)}{\omega[(s/\omega - m\omega)^2 + r^2]^{1/2}}$$
$$= \frac{F}{\omega Z_m}\cos\,(\omega t - \phi) = x_0\,\cos\,(\omega t - \phi). \qquad (৩\text{-}৪.৮ক)$$

এবং অনুরূপেই $x_2 = (F/\omega Z_m)\,\sin\,(\omega t - \phi) = x_0\,\sin\,(\omega t - \phi)$

(৩-৪.৮খ)

সমীকরণ দুটি, পরস্পর সমকোণে দুটি পরবশ সরণের গণিতীয় প্রতিরূপ। তাদের (i) স্পন্দনবিস্তার চরমমান ($F/\omega Z_m$) ধ্রুবরাশি (ii) স্পন্দনাংক (ω)

আরোপিত স্পন্দনাংকের সমান, আর (iii) যেকোন নিমেষে সরণ, প্রযুক্ত পর্যাবৃত্ত বলের থেকে ϕ দশাকোণে পশ্চাৎগামী বা অনুবর্তী।

৩-৪.৮ সমীকরণে Z_m রাশিটিকে যান্ত্রিক বাধ বলে। রাশিটি বিদ্যুৎ-বর্তনীতে বৈদ্যুতিক বাধের নজির থেকে আনা হয়েছে। ৩-৭ অনুচ্ছেদে এর সম্বন্ধে বিস্তারিত আলোচনা করা হবে। তার মান

$$Z_m = \sqrt{r^2 + (m\omega - s/\omega)^2} \tag{৩-৪.৯}$$

৩-৪.৮ কিন্তু ৩-৪.২ অবকল সমীকরণের পূর্ণ সমাধান নয়, তার বিশিষ্ট সমাকল মাত্র। তার পূর্ণ সমাধান পেতে, তার সম্পূরক ফলন (complementary function) বিশিষ্ট সমাকলের (particular integral) সঙ্গে যোগ করতে হয়। ৩-৪.২ এর ডানদিকে শূন্য বসিয়ে যে সমাধান মেলে সেটিই নির্ণেয় ফলন; স্পষ্টতই এই সমাধান মন্দিত দোলনে সরণের নিমেষ মান। সুতরাং ৩-৪.২ অবকলন সমীকরণের পূর্ণ সমাধান হবে

$$x_1 = ae^{-kt}\cos(\omega t - \varepsilon) + (F/\omega Z_m)\cos(\omega t - \phi) \tag{৩-৪.১০}$$

3·1 চিত্রে ৩-৪.১০ এর কাল-সরণ লেখ দেখানো হয়েছে। এই সমীকরণ গতির ভৌত নিরপেক্ষতার আর একটি নিদর্শন।

খ. র‍্যালের সমাধান: প্রতিভাধর বিজ্ঞানী র‍্যালের পদ্ধতিতে পরবশ স্পন্দনের অবকল সমীকরণের সমাধান (৩-৪.১০) সরাসরি আসে। আমরা ৩-৪.১(খ) সমীকরণ নিয়ে সুরু করি

$$m\ddot{x}_2 + r\dot{x}_2 + sx_2 = F\sin\omega t$$

বা $$\ddot{x}_2 + 2k\dot{x}_2 + sx_2 = f\sin\omega t$$

ধরা যাক $d\tau$* অবসর জুড়ে চালক-বল সক্রিয়; তাহলে τ মুহূর্তে ভরবেগ

$$mv_\tau = F\sin\omega\tau.\, d\tau \text{ এবং বেগ } v_\tau = f\sin\omega\tau.\, d\tau = \dot{x}_\tau$$

তাহলে ২-৪.৪ সমীকরণ থেকে লিখতে পারি

$$x_\tau = \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \cdot e^{-k(t-\tau)}\sin\omega_0(t-\tau)$$

* এই τ শ্লথন-কাল নয়।

তাহলে t অবসর পরে সরণ দাঁড়াবে

$$x_t=\int_0^t e^{-k(t-\tau)}\,\frac{f\sin\omega\tau}{\omega_0}\sin\omega_0(t-\tau)d\tau$$

$$=\frac{fe^{-kt}}{\omega_0}\int_0^\tau e^{k\tau}.\sin\omega\tau.\sin\omega_0(t-\tau)d\tau$$

$$=\frac{fe^{-kt}}{\omega_0}\int_0^t e^{k\tau}.\tfrac{1}{2}\left[\cos\{(\omega+\omega_0)\tau-\omega_0 t\}-\cos\{(\omega-\omega_0)\tau+\omega_0 t\}\right]d\tau$$

$$=\frac{fe^{-kt}}{2\omega_0}\left[\frac{\omega+\omega_0}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}\left\{e^{kt}\sin\omega t-\sin(-\omega_0 t)\right\}\right.$$
$$+\frac{k}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}\left\{e^{kt}.\cos\omega t-\cos(-\omega_0 t)\right\}$$
$$-\left\{\frac{\omega-\omega_0}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}(e^{kt}\sin\omega t-\sin\omega_0 t)\right.$$
$$\left.\left.+\frac{k}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}(e^{kt}\cos\omega t-\cos\omega_0 t)\right\}\right]$$

$$=\frac{fe^{-kt}}{2\omega_0}\left[\left\{\frac{\omega+\omega_0}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}(e^{kt}\sin\omega t+\sin\omega_0 t)\right.\right.$$
$$\left.+\frac{k}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}(e^{kt}\cos\omega t-\cos\omega_0 t)\right\}$$
$$-\frac{\omega-\omega_0}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}(e^{kt}\sin\omega t-\sin\omega_0 t)$$
$$\left.+\frac{k}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}(e^{kt}\cos\omega t-\cos\omega_0 t)\right]$$

$$=\frac{fe^{-kt}}{2\omega_0}\left[e^{kt}\sin\omega t\left\{\frac{\omega+\omega_0}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}-\frac{\omega-\omega_0}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}\right\}\right.$$
$$+\sin\omega_0 t\left\{\frac{\omega+\omega_0}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}+\frac{\omega-\omega_0}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}\right\}$$
$$+e^{kt}\cos\omega t\left\{\frac{k}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}+\frac{k}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}\right\}$$
$$\left.\cdot\cos\omega_0 t\left\{\frac{k}{(\omega+\omega_0)^2+k^2}+\frac{k}{(\omega-\omega_0)^2+k^2}\right\}\right]$$

$$=\frac{f\sin[\omega t-\tan^{-1}2k\omega/(\omega_0^2-\omega^2)]}{[(\omega^2-\omega_0^2)^2+4k^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$+e^{-kt}(A\cos\omega_0 t+B\sin\omega_0 t) \quad (৩\text{-}৪.১১)$$

এখানে
$$A=-\frac{f\omega}{\omega_0}\cdot\frac{2k\omega_0}{(\omega^2-\omega_0^2)^2+4k^2\omega^2} \quad (৩\text{-}৪.১২ক)$$

$$B=\frac{f\omega}{\omega_0}\frac{(\omega^2-\omega_0^2)+2k^2}{(\omega^2-\omega_0^2)^2+4k^2\omega^2} \quad (৩\text{-}৪.১২খ)$$

ধ্রুবকগুলির মান সাপেক্ষে (৩-৪.১০) এবং (৩-৪.১১) সমাধান অভিন্ন। ৩-৪.১১ সমাধানে প্রথম রাশিটি নিয়মিত পরবশ স্পন্দন আর দ্বিতীয় রাশিটি অচির বা অস্থেয় মন্দিত দোলন নির্দেশ করে। র‍্যালে পদ্ধতিতে সমাধান করলে মন্দিত ও পরবশ দোলনের গণিতীয় প্রতিরূপ একযোগেই আসে।

৩-৫. অচির স্পন্দন :

3.1 চিত্রে এবং ৩-৪.১০, ৩-৪.১১ সমীকরণে আমরা দেখেছি যে পরবশ কম্পনের সুরুতে, কমবেশী সময় ধরে স্ববশ স্পন্দন হয়। তাকে আমরা অস্থেয়, অস্থায়ী বা অচির স্পন্দন বলি—সে উল্লেখও ৩-১ অনুচ্ছেদে পরবশ দোলনের বৈশিষ্ট্য আলোচনা প্রসঙ্গে করেছি। এর উপস্থিতির কারণে পরবশ স্পন্দন সুরু হলে খানিকক্ষণ অনিয়মিত কম্পন হতে থাকে। তবে তার স্পন্দনবিস্তার সূচকীয় হারে (e^{-kt}) কমতে কমতে শেষে লোপ পায়। শাসক এবং শাসিত স্বভাবী স্পন্দনাংক ω এবং ω_0 কাছাকাছি হলে, অস্থায়ী স্বরকম্পের আবির্ভাব হয়; মন্দন-গুণাংক যত কম হয় স্বরকম্পের স্থায়িত্ব তত দীর্ঘ। শুধু সুরুতে নয়, স্পন্দনের শেষেও অর্থাৎ চালক বল অপসারিত হলে পর অচির স্পন্দন দেখা দেয়। L-R এবং C-R বৈদ্যুতিক বর্তনীতে বিদ্যুৎধারার হ্রাস এই ব্যাপারেরই বৈদ্যুতিক সংস্করণ। চালক বল নিষ্ক্রিয় হওয়ার মুহূর্তে স্পন্দকে কিছুটা বেগ বা কিছুটা সরণ বা দুই-ই, থেকে যায়ই। মন্দিত হতে হতে থেমে যেতে স্পন্দকের খানিকটা সময় তো লাগবেই—তাই-ই অচির স্পন্দন।

বাদ্যযন্ত্রে সুরসৃষ্টিকালে অচির স্পন্দনের ভূমিকা গুরুত্বপূর্ণ; কেননা যখনই শব্দ শুরু হয় বা থামে তখনই এরা দেখা দেয়। তাই বাজনার নিয়মিত সুর আর তার গোড়ায় বা শেষের মুহূর্তে সুরের মধ্যে সুরজাতির তফাৎ থাকে; যে-কোন তারের বাজনা মন দিয়ে শুনলেই তা টের পাবে। টানা সুর বাজা-কালে

বেহালা আর সেলোর মধ্যে তফাৎ সহজে ধরা যায় না, কিন্তু সুরুতে বা শেষে তফাৎ বুঝতে কোন অসুবিধাই হয় না। তার কারণ মন্দিত দোলনমাত্রেই বিশেষরকম জটিল, তার ফুরিয়ার বিশ্লেষণে (১০-১১) অনেকগুলি ভিন্ন কম্পাংক আর স্পন্দনবিস্তারের সুর মেলে, যারা টানা সুরে উপস্থিত ছিল না; ভিন্ন ভিন্ন যন্ত্রে মন্দিত দোলনের প্রকৃতি আলাদা হওয়ায় নবাগত সুরগুলিও আলাদা। মাইক্রোফোন এবং লাউডস্পীকারের প্রতিবেদন (response) বা সাড়ার মূলশব্দানুগতা (fidelity) বিচারে, অচির স্পন্দনের (বিশেষভাবে অবক্ষয়কালে) গুরুত্ব সমধিক। এসব ক্ষেত্রে এদের উপস্থিতি একেবারেই অবাঞ্ছিত। বড় বড় হলঘরে অনুরণন (reverberation)-কাল অচিরস্পন্দনের ক্ষয়হারের ওপর বিশেষভাবে নির্ভর করে। অনুরণন-কাল বেশী বা কম হওয়া কোনটিই কাম্য নয়।

অচির স্পন্দনাংক স্পন্দকের স্বকীয় কম্পাংকের ওপর নির্ভর করে, তার সঙ্গে চালক কম্পাংকের কোন সম্পর্কই নেই। স্পন্দকে ঘাত প্রয়োগ করলে অচির স্পন্দন হয়, নিয়মিত স্পন্দন কখনই হয় না। ঢাক, ঢোল, কাড়া, নাকাড়া প্রভৃতি সংঘট্টশ্রেণীর বাদ্যযন্ত্রে ঘাতপ্রয়োগে (চাঁটি মেরে) অস্থায়ী স্পন্দনের সৃষ্টি হয়; এদের স্পন্দন অনিয়ত, শব্দের প্রকৃতি জটিল।

৩-৬. নিয়মিত পরবশ কম্পনে স্পন্দনবেগ :

যেকোন গতির বেলাতেই সরণকে সময়-সাপেক্ষে অবকলন করলে বেগ মেলে—স্পন্দনের বেলাতেও তাই। কাজেই ৩-৪.১(ক) সমীকরণকে বেগের আকারে প্রকাশ করলে হয়

$$m\dot{v}+rv+s\int v.dt^{*}=F\cos\omega t$$

আর জটিল রাশির আকারে লিখলে দাঁড়ায়

$$m\dot{\mathbf{v}}+r\mathbf{v}+s\int \mathbf{v}.dt=Fe^{j\omega t} \qquad (৩\text{-}৬.১)$$

এখানে জটিল রাশি $\mathbf{v}$-র বাস্তব অংশ আমাদের নির্ণেয় সমাধান—পরথ-সমাধান ধরা যাক

$\mathbf{v}=\mathbf{v}_0e^{j\omega t}$; তাহলে $\dot{\mathbf{v}}=j\omega\mathbf{v}$ আর $\int \mathbf{v}.dt=\mathbf{v}/j\omega$

---

* $x=\int v.dt$ সমাকলনে সমাকলন ধ্রুবক শূন্য ধরলেও সমীকরণে পরিবর্তন হবে না, কারণ তার সব রাশিগুলিই t-নির্ভর কিন্তু ধ্রুবকটি t-নিরপেক্ষ।

সুতরাং অবকল সমীকরণের মান দাঁড়ায়

$$(j\omega m + r + s/j\omega)\mathbf{v} = Fe^{j\omega t}$$

$$\therefore \quad \mathbf{v} = \frac{Fe^{j\omega t}}{r + j(\omega m - s/\omega)} = \frac{Fe^{j(\omega t - \theta)}}{[r^2 + (\omega m - s/\omega)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

(৩-৬.২)

৩-৪.৬ সমীকরণ যেভাবে পাওয়া গেছে, এটিকেও সেভাবে পাওয়া যায় এবং সেইরকমেই

$$\tan\theta = (\omega m - s/\omega)/r \qquad (৩\text{-}৬.৩)$$

$$\therefore \quad \text{নির্ণেয় বেগ} \quad v = \frac{F\cos(\omega t - \theta)}{[r^2 + (m\omega - s/\omega)^2]^{\frac{1}{2}}} = \frac{F}{Z_m}\cos(\omega t - \theta)$$

(৩-৬.৪)

এখানেও Z_m যান্ত্রিক বাধ, তার মান ৩-৪.৯-এ যা মিলেছিল তাই-ই। কিন্তু সরণের পশ্চাৎ-দশা (৩-৪.৫খ) আর বেগের পশ্চাৎ-দশা (৩-৬.৩) আলাদা। কেননা

$$\tan\phi = \frac{2k\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{(r/m)\omega}{s/m - \omega^2} = \frac{r\omega/m}{\omega(s/\omega - m\omega)/m}$$

$$= \frac{r}{(s/\omega - m\omega)} \qquad (৩\text{-}৬.৫ক)$$

আর $\tan\theta = (m\omega - s/\omega)/r = \cot\phi = \tan(\pi/2 - \phi)$;

সুতরাং $\qquad (\phi - \theta) = \pi/2 \qquad$ (৩-৬.৫খ)

অতএব সরণদশা ও বেগদশার মধ্যে একপাদ দশান্তর অর্থাৎ চরম সরণে শূন্য বেগ, চরম বেগে শূন্য সরণ।

৩-৭. পরবশ স্পন্দনের বৈদ্যুতিক উপমিতি :

২.৭ অনুচ্ছেদে LCR বর্তনীতে ক্ষয়িষ্ণু-বিস্তার বিদ্যুৎ-মোক্ষণ আমরা আলোচনা করেছি। এই দোলনী প্রবাহধারা অক্ষুণ্ণ রাখতে গেলে বর্তনীতে প্রত্যাবর্তী তড়িচ্চালক বল প্রয়োগ করা চাই। তাহলে বর্তনীতে আধান চলার সমীকরণ ২-৭.২ থেকেই পাব—

$$L\ddot{Q} + R\dot{Q} + Q/C = E\cos\omega t \qquad (৩\text{-}৭.১)$$

বা $\ddot{Q}+(R/L)\dot{Q}+Q/LC=(E/L)\cos\omega t=E_0\cos\omega t$
আবার প্রবাহ $i=\dot{Q}$ ব'লে ওপরের সমীকরণের রূপ দাঁড়াবে

$$\frac{di}{dt}+\frac{R}{L}i+\frac{1}{LC}\int_0^t i.dt=E_0e^{j\omega t}$$

$$i=\frac{E_0e^{j\omega t}}{R+j(\omega L-1/\omega C)}=\frac{E_0e^{j\omega t}}{R+jX}=\frac{E_0e^{j\omega t}}{Z} \quad (৩\text{-}৭.২)$$

এই সমীকরণে Z-কে বৈদ্যুতিক বাধ, R-কে বৈদ্যুতিক রোধ আর $X(=\omega L-1/\omega C)$-কে বৈদ্যুতিক প্রতিক্রিয়তা (reactance) বলে। বাস্তব প্রবাহ (i) তড়িচ্চালক বল (E_0) থেকে θ কোণে পেছিয়ে থাকে—

$$\theta=\tan^{-1}[(\omega L-1/\omega C)/R]$$

যান্ত্রিক পরবশ স্পন্দনে কণার সরণ আর আবেশক-ধারক-রোধকের শ্রেণী-সমবায়ে প্রত্যাবর্তী তড়িচ্চালক বলের ক্রিয়ায় আধান চলাচলের, অবকল সমীকরণের

$$m\ddot{\xi}+r\dot{\xi}+s\xi=Fe^{j\omega t} \quad (৩\text{-}৭.৩ক)$$

$$L\ddot{Q}+R\dot{Q}+Q/C=E_0e^{j\omega t} \quad (৩\text{-}৭.৩খ)$$

রূপ অভিন্ন, খালি ধ্রুবকগুলি ভিন্ন ভিন্ন ভৌত রাশি। ৩-৪.৮ এবং ৩-৭.২ সমাধানগুলিকে তুলনা করলে তাদের পারস্পরিক সাদৃশ্য দাঁড়ায় নিচের সারণীর মতো—

(1) ভর (m) → বৈদ্যুতিক স্বাবেশাংক (L) ;
(2) যান্ত্রিক রোধ (r) → বৈদ্যুতিক রোধ (R) ;
(3) স্প্রিং বা দার্ঢ্য-গুণাংক (s) → $\dfrac{1}{\text{নম্যতা } (C_m)}$ → $\dfrac{1}{\text{বৈদ্যুতিক ধারকত্ব } (C)}$;
(C_m = compliance)
(4) সরণ (x বা ξ) → বৈদ্যুতিক আধান (Q) ;
(5) বেগ $(v=\dot{x})$ → বিদ্যুৎধারা $(i=\dot{Q})$;
(6) চালক বল (F) → তড়িচ্চালক বল (E_0).

বাধ—বৈদ্যুতিক ও যান্ত্রিক: ৩-৬.২ সমীকরণে আর ৩-৭.২ সমীকরণ থেকে দেখছি যে পরবশ স্পন্দনে কণাবেগ ও RLC বর্তনীতে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎধারার মান যথাক্রমে

$$v = \frac{Fe^{j\omega t}}{r + j(m\omega - s/\omega)} = Fe^{j\omega t}/Z_m$$

$$i = \frac{E_0 e^{j\omega t}}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{E_0 e^{j\omega t}}{R + jX} = E_0 e^{j\omega t}/Z$$

দ্বিতীয় সমীকরণে $Z = R + jX$ রাশিটিকে বৈদ্যুতিক বাধ (Electrical impedance) বলে—তার দুই অংশ বৈদ্যুতিক রোধ R, বৈদ্যুতিক প্রতিক্রিয়তা (X); প্রতিক্রিয়তার (reactance) আবার দুই অংশ—আবেশী $(X_L = \omega L)$ এবং ধারকীয় $(X_C = 1/\omega C)$ প্রতিক্রিয়তা ; এরাও বিদ্যুৎধারাকে বাধা দেয় কিন্তু সেই বাধা চালক কম্পাংকের ওপর নির্ভর করে।

এই নামানুসরণে $Z_m\,[= r + j\,(\omega m - s/\omega)]$-কে জটিল যান্ত্রিক বাধ বলা হয়েছে। তার মান

$$Z_m = r + jX_m = (r^2 + X_m{}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$= [r^2 + (m\omega - 1/\omega C_m)^2]^{\frac{1}{2}} \qquad (৩\text{-}৭.৪)$$

এবং তার দশাকোণ $\theta = \tan^{-1}(X_m/r) = \tan^{-1} \dfrac{\omega m - 1/\omega C_m}{r}$

(৩-৭.৫)

এখানে X_m যান্ত্রিক প্রতিক্রিয়তা ; তারও দুই অংশ, ভর তথা জাড্যসংক্রান্ত $(m\omega)$ এবং স্প্রিং তথা নম্যতাসংক্রান্ত $(1/\omega C_m)$; রাশিগুলির নাম বৈদ্যুতিক পরিভাষা থেকেই ধার করা হয়েছে।

যান্ত্রিক বাধ আর তার দুই উপাংশ যান্ত্রিক রোধ (r) আর যান্ত্রিক প্রতিক্রিয়তা এবং তাদের মধ্যে সম্পর্কগুলি, উপমিত বৈদ্যুতিক রাশিগুলির সঙ্গে অভিন্ন। যেকোন নিমেষে পর্যাবৃত্ত চালক বল $(Fe^{j\omega t})$ এবং সেই মুহূর্তে কণাবেগ (v), এদের অনুপাতই যান্ত্রিক বাধ। বল এবং বেগ সমদশা না হলে, বাধ জটিল রাশি হবে এবং তার মান চরম বল ও চরম বেগের অনুপাত হবে। দুয়ের মধ্যে দশাভেদ প্রতিক্রিয়তা আর রোধের অনুপাতের ওপর (৩-৭.৫) নির্ভরশীল। বেগ সদাই বলের অনুবর্তী অর্থাৎ পেছনে

থাকে—বেগ চরমমাত্রা হয় বলের মান চরমমাত্রা ছাড়িয়ে যাওয়ার পরে ; ৩-৭.৫ এদের দশান্তর কোণ নির্দেশ করে।

যান্ত্রিক বাধের একককে যান্ত্রিক ওহম্ বলে। বল/বেগ অর্থাৎ ভর/সময় এই রাশির মাত্রক অর্থাৎ সিজিএস পদ্ধতিতে যান্ত্রিক ওহম্ = গ্রাম/সে একক।

৩-৮. পরবশ স্পন্দনে শক্তি সম্পর্কে আলোচনা :

নিয়মিত পরবশ স্পন্দনে চালকের যোগানো সমস্ত শক্তিটাই বাধা বলের বিরুদ্ধে কাজ করতে খরচ হয়ে যায়—তবেই স্পন্দন নিয়মিত হতে পারে।

ক. **চালকের শক্তি যোগানোর সময়হার**—স্পষ্টতই এই রাশিটি চালকের **ক্ষমতা** ; যেকোন মুহূর্তে তার মান ঐ নিমেষে বল এবং বেগের গুণফলের সমান। সুতরাং

$$P_t = F\cos\omega t \times \dot{x} = F\cos\omega t \times F\cos(\omega t-\theta)/Z_m$$
$$= \frac{F^2}{Z_m}(\cos^2\omega t.\cos\theta + \cos\omega t.\sin\omega t.\sin\theta)$$
$$= (F^2/Z_m)(\cos^2\omega t.\cos\theta + \tfrac{1}{2}\sin 2\omega t.\sin\theta) \quad (৩\text{-}৮.১)$$

পূর্ণ এক দোলনে, বেগ ও বলের পর্যাবৃত্তির এক চক্র সম্পূর্ণ হয়। এক চক্রে $\cos^2\omega t$ রাশির গড় মান $\frac{1}{2}$ আর $\sin 2\omega t$ রাশির গড় মান শূন্য। কাজেই এক চক্রে গড় ক্ষমতা

$$\overline{P} = \tfrac{1}{2}(F^2/Z_m)\cos\theta \quad (৩\text{-}৮.২)$$
$$= \frac{1}{2}\cdot\frac{F^2}{Z_m}\cdot\frac{1}{[1+\tan^2\theta]^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{F^2}{Z_m}\cdot\frac{1}{[1+(X_m/r)^2]^{\frac{1}{2}}}$$
$$= \frac{1}{2}\,\frac{F^2}{Z_m}\cdot\frac{r}{(r^2+X_m{}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{2}\cdot\frac{F^2 r}{Z_m{}^2} \quad (৩\text{-}৮.৩)$$

খ. **বাধা বলের বিরুদ্ধে কৃতকার্য :** নিয়মিত পরবশ স্পন্দনকালে মাধ্যমে বাধাজনিত বল $rv = r\dot{x}$ ধরা হয়েছে। দোলন বজায় রাখতে তার বিরুদ্ধে কাজের পরিমাণ হবে—বল × সরণ বা $rv \times x$ আর সেই কাজ করার

নিমেষ-সময়হার $rv \times \dot{x}$ বা rv^2 হবে। ৩-৬.৪ থেকে v-র মান বসালে, পাব

$$rv^2 = r.\frac{F^2}{Z_m^2}\cos^2(\omega t - \theta) \qquad (৩\text{-}৮.৪)$$

এবং এক পর্যাবৃত্তি বা পূর্ণ চক্রে বাধা বলের বিরুদ্ধে কৃত গড় কার্যহার দাঁড়াবে

$$\overline{rv^2} = \frac{rF^2}{Z_m^2} \times \frac{1}{2} \qquad (৩\text{-}৮.৫)$$

এই মান ৩-৮.৩ সমীকরণে P-র মানের সমান ; অর্থাৎ এক চক্রে চালক গড়ে যে হারে শক্তি যোগায় আর সেই সময়ে স্পন্দক বাধা বলের বিরুদ্ধে যতখানি কাজ করে, তারা সমান ; এই তথ্যটাই অনুচ্ছেদের গোড়ায় আমরা বলেছি।

গ. ক্ষমতা গুণিতক (Power factor) : ৩-৮.২ সমীকরণ থেকে বুঝছি যে $\cos\theta$ রাশিটি চালকের ক্ষমতা যোগানোর গড় মান নিয়ন্ত্রণ করে ; এর মান এক হলে, ক্ষমতা চূড়ান্তমান। যেহেতু কোসাইন রাশির মান 1-এর চেয়ে বাড়ে না, সেইহেতু গড় ক্ষমতার মান $\frac{1}{2}(F^2/Z_m)$-এর চেয়ে অল্পাবিস্তর কমই থাকে ; কতটা কম তা $\cos\theta$-র মানের ওপর নির্ভর করে। তাই এই রাশিটিকে ক্ষমতা-গুণিতক বলা হয়। এখন ৩-৭.৫ থেকে

$$\tan\theta = \frac{X_m}{r}; \text{ এখন } \sec^2\theta = 1 + \tan^2\theta = \frac{r^2 + X_m^2}{r^2}$$

তাহলে
$$\cos\theta = \frac{r}{Z_m} \qquad (৩\text{-}৮.৭)$$

যেহেতু ক্ষমতার মান $\cos\theta$-নির্ভর তাই তার মান ধনাত্মক বা ঋণাত্মক হতে পারে ; ঋণাত্মক হলে চালক চালিতের কাছ থেকে শক্তি ফেরৎ নেবে —এটি যুগ্ম স্পন্দনের (৪ অধ্যায়) ঘটনা। আমাদের বর্তমান আলোচনায় ধরে নেওয়া হয়েছে যে প্রত্যার্পিত শক্তির মান নগণ্য, শক্তির প্রবাহ একমুখী চালক থেকে স্পন্দকে, বিপরীতদিকে নয়। আবার

$$\overline{P} = \frac{1}{2}\cdot\frac{F^2}{Z_m}\cdot\cos\theta = \frac{F}{\sqrt{2}}\cdot\frac{F}{\sqrt{2}Z_m}\cdot\cos\theta$$

$$= F_{rms} \times v_{rms} \times \cos\theta \qquad (৩\text{-}৮.৭)$$

[কোন পর্যাবৃত্ত রাশির চরম মানকে $\sqrt{2}$ দিয়ে ভাগ করলে তার *rms* মান মেলে] সুতরাং স্পন্দকের ওপর প্রযুক্ত কার্যকরী (effective) পর্যাবৃত্ত

বল F_{rms} আর উৎপন্ন কার্যকরী বেগ v_{rms} এর গুণফলকে $\cos\theta$ দিয়ে গুণ করলে তবে চালকের গড় ক্ষমতা পাওয়া যায়।

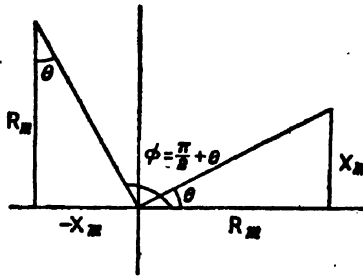
ঘ. দশা সম্পর্কে আলোচনা : দেখা যাচ্ছে (৩-৮.৭), ক্ষমতা তথা শক্তির পরিমাণ বিশেষভাবেই দশাকোণ-নির্ভর। ৩-৪.৮ থেকে দেখছি সরণ (x) প্রযুক্ত বলের (F) থেকে ϕ কোণে পেছিয়ে, আর ৩-৬.৪ থেকে দেখছি যে বেগ, বল থেকে θ কোণে পশ্চাৎবর্তী। এখন ৩-৪.৫ (খ) থেকে

$$\tan\phi = \frac{2k\omega}{\omega_0^2-\omega^2} = \frac{(r/m)\omega}{(s/m-\omega^2)} = \frac{\omega r}{(s-m\omega^2)}$$

$$= \frac{\;}{(s/\omega - m\omega)} = \frac{\;}{-X_m} \qquad (৩\text{-}৮.৮\text{ ক})$$

আবার ৩-৬.৩ থেকে $\tan\theta = \frac{m\omega - s/\omega}{r} = \frac{X_m}{r}$ (৩-৮.৮খ)

$$\therefore \quad \tan\theta = -\cot\phi \text{ বা } \phi = (\pi/2+\theta) \qquad (৩\text{-}৮.৯)$$

3-5 চিত্রে দুই দশাকোণ θ এবং ϕ এর মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। (এখানে r-এর জায়গায় R_m আঁকা আছে)।

চিত্র 3.5—দুই দশাকোণের মধ্যে সম্পর্ক

উদাহরণ : (১) 2 গ্রাম ভরের এক সরল দোলকের পর্যায়কাল 2 সে এবং সরণ-বিস্তার 2 সেমি। 10 বার দোলনের পর বিস্তার 1·5 সেমি হয়। সরণ-বিস্তার আদিমানে অক্ষুণ্ণ রাখতে চালক-ক্ষমতা কত হবে ?

সমাধান ঃ ৩-৮.৩ থেকে ক্ষমতা $\overline{P}=\frac{1}{2}\cdot\frac{F^2r}{Z_m^2}$

৩-৪.৮ থেকে সরণবিস্তার $x_0=F/\omega Z_m$

$$\therefore \quad \frac{F}{Z_m}=\omega x_0=\frac{2\pi}{2}\times 2$$

আবার $r=2k.m=2\delta/T=\frac{2}{nT}\ln\left(\frac{x_0}{x_n}\right)=\frac{2}{10\times 2}\ln\frac{2}{1\cdot 5}$

$$\overline{P}=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{F}{Z_m}\right)^2\cdot\ r=\frac{1}{2}\cdot 4\pi^2.\ 0\cdot 1\times 2\cdot 303\times\log\ (4/3)$$

$$=0\cdot 2\pi^2\times 2\cdot 303\times(0\cdot 6021-0\cdot 4771)$$

$$=0\cdot 4606\times(3\cdot 142)^2\times 0\cdot 1250=0\cdot 57$$

(২) দেখাও যে পরবশ স্পন্দকের গড় মোট শক্তির মান

$$E=K+V=\tfrac{1}{4}mx_0^2(\omega^2+\omega_0^2)$$

এবং উৎকর্ষ অনুপাত $Q=\frac{1}{2}(\omega\tau)[1+(\omega_0/\omega)^2]$

সমাধান ঃ স্পন্দকের গতিশক্তি

$$K=\tfrac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}m\frac{F^2}{Z_m^2}\cos^2\ (\omega t-\theta)$$

$$=\tfrac{1}{2}m\omega^2x_0^2\ \cos^2(\omega t-\theta)\quad [\text{৩-৪.৮খ দেখ}]$$

স্পন্দকের স্থিতিশক্তি $V=\frac{1}{2}sx^2=\frac{1}{2}m\omega_0^2\frac{F^2}{(\omega Z_m)^2}\cos^2(\omega t-\phi)$

এখন পূর্ণ এক চক্রে গড় গতিশক্তি $\overline{K}=\frac{1}{2}m\omega^2x_0^2.\frac{1}{2}=\frac{1}{4}m\omega^2x_0^2$

আবার পূর্ণ এক চক্রে গড় স্থিতিশক্তি $\overline{V}=\frac{1}{2}m\omega_0^2x_0^2.\frac{1}{2}$

$$=\tfrac{1}{4}m\omega_0^2x_0^2$$

(a) সুতরাং স্পন্দকের মোট গড় শক্তি

$$\overline{K}+\overline{V}=\tfrac{1}{4}mx_0^2(\omega^2+\omega_0^2)$$

(b) ২-৫.৬ থেকে উৎকর্ষ অনুপাত $Q=\frac{2\pi\ (\text{সঞ্চিত শক্তি})}{\text{প্রতি চক্রে অপচিত শক্তি}}$

$$=\frac{2\pi\overline{E}}{\overline{P}/n}=\frac{\omega\overline{E}}{\overline{P}}=\frac{(\omega/4)mx_0^2(\omega^2+\omega_0^2)}{\frac{1}{2}.r.(F^2/Z_m^2)}$$

$$=\frac{1}{2}.\frac{m\omega x_0^2(\omega^2+\omega_0^2)}{r.\omega^2 x_0^2}$$

$$=\frac{1}{2}.\frac{m}{r}.\omega\frac{\omega^2+\omega_0^2}{\omega^2}=\frac{1}{2}(\omega\tau)\,[1+(\omega_0/\omega)^2]$$

প্রশ্ন ঃ দেখাও যে গড় $\frac{\text{স্থিতিশক্তি}}{\text{গতিশক্তি}}=\left(\frac{\text{চালিত কম্পাংক}}{\text{চালক কম্পাংক}}\right)^2$

৩-৯. পরবশ স্পন্দনে সরণ ও বেগ ঃ

নিয়মিত পরবশ স্পন্দনে যেকোন নিমেষে স্পন্দনের সরণ এবং বেগ যথাক্রমে ৩-৪.৮ এবং ৩-৬.৪ থেকে পাই

$$x=F/(\omega Z_m)\cos(\omega t-\phi)=x_0\cos(\omega t-\phi)$$

এবং
$$v=\dot{x}=(F/Z_m)\cos(\omega t-\theta)=v_0\cos(\omega t-\theta)$$

অর্থাৎ সরণবিস্তার $x_0(=F/\omega Z_m)$ এবং বেগবিস্তার $v_0(=F/Z_m=\omega x_0)$ দুইই চালক বলের কম্পাংকের $(n=\omega/2\pi)$ ওপর নির্ভর করে ; অর্থাৎ ω বদলালে দুয়েরই বিস্তার বদলাবে। এখন ৩-৪.৯ থেকে যান্ত্রিক বাধ পাচ্ছি

$$Z_m^2=r^2+(m\omega-s/\omega)^2=(2km)^2+(m\omega-m\omega_0^2/\omega)^2$$

$$=4k^2m^2+\frac{m^2}{\omega^2}(\omega^2-\omega_0^2)^2$$

$$=\frac{m^2}{\omega^2}[\,4k^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)] \qquad (৩\text{-}৯.১ক)$$

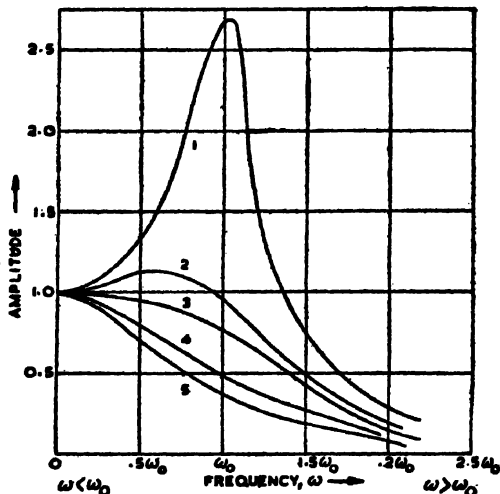
$$=m^2\left[4k^2+\omega_0^2\left(\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right] \qquad (৩\text{-}৯.১খ)$$

ক. সরণবিস্তার ঃ আমরা ৩-৪.৮ এবং ৩-৯.১ক থেকে বলতে পারি

$$x_0=\frac{F}{\omega Z_m}=\frac{F}{\omega.(m/\omega)[4k^2\omega^2+(\omega^2-\omega_0^2)]^{1/2}}$$

$$=\frac{F}{m\omega[\omega_0^2(\omega/\omega_0-\omega_0/\omega)^2+4k^2]^{1/2}} \qquad (৩\text{-}৯.২)$$

এই সমীকরণে F, m, k, ω_0 সকলেই ধ্রুবরাশি, একমাত্র চালক কম্পাংক $(\omega/2\pi)$ চলরাশি ; দেখা যাচ্ছে সরণবিস্তার (x_0) চালক কম্পাংকের ব্যস্তানুপাতিক।

3.6 চিত্রে ভিন্ন ভিন্ন মন্দনে (k) সরণবিস্তার কিভাবে চালক কম্পাংকের সঙ্গে বদলায় তা দেখানো হয়েছে। 1, 2, 3, 4, 5 চিহ্নিত x_0—ω

চিত্র 3.6—সরণ-অনুনাদ

রেখাগুলিতে মন্দনাংক সামান্য মান থেকে ক্রমে ক্রমে বেড়েছে—যথাক্রমে $7\omega_0/20$, $\omega_0/2$, $2\omega_0/3$, ω_0, $6\omega_0/5$; চিত্র থেকে বোঝা যাচ্ছে যে **মন্দন k কম হলে** (1 চিহ্নিত রেখা)

(ক) $\omega=\omega_0$ খাড়া রেখার কাছাকাছি প্রতিবেদন-বক্র সূক্ষ্মশীর্ষ হয়

(খ) $\omega < \omega_0$ অংশে কম্পাংক যত ω_0-র দিকে এগোয় সরণবিস্তার ততই দ্রুতহারে বাড়ে

(গ) $\omega=\omega_0$ মানের সামান্য পরে সরণবিস্তার চূড়ান্তমান (বিস্তার-অনুনাদ) হয়

(ঘ) $\omega > \omega_0$ অংশে সরণবিস্তার দ্রুততর হারে কমে যায় আর

(ঙ) $\omega=\omega_0$ রেখা থেকে দূরে সরণবিস্তার বেশ কম।

2 এবং 3 চিহ্নিত বক্রে (curve) মন্দন-গুণাংক ক্রমশ বাড়ানোর ফল চিত্রিত হয়েছে। তাদের বেলায় (*i*) প্রতিবেদন-বক্রের শীর্ষ $\omega=\omega_0$ রেখা থেকে ক্রমেই দূরে সরে যায়, (*ii*) তারা স্থূলশীর্ষ এবং (*iii*) তাদের চূড়ান্ত-বিস্তারও অনেক কম। পরের রেখাগুলিতে ω বাড়ার সঙ্গে বিস্তার কমেই যেতে থাকে। সুতরাং সবশুদ্ধ বলতে পারি

(১) মন্দন নির্বিশেষে অনুনাদী কম্পাংক থেকে দূরে পরবশ স্পন্দনে সাড়া অল্পই মেলে

(২) মন্দন অল্প হলে অনুনাদী কম্পাংকের কাছাকাছি সাড়া অর্থাৎ সরণবিস্তার অনেক বেশী হয়

(৩) $\omega=\omega_0$ রেখা সাপেক্ষে প্রতিবেদনে অসামঞ্জস্য আছে, কম কম্পাংকে বক্রের উন্নতিহার, বেশী কম্পাংকে অবনতিহারের তুলনায় কম। ৩-৪.৮ এই আচরণের কারণ নির্দেশ করছে—ω যতই বাড়বে সরণবিস্তার x_0 ততই কমবে।

স্পন্দকের স্থিতিশক্তি $\frac{1}{2}sx^2$ ব'লে সরণবিস্তারের (x_0) ভিন্ন ভিন্ন মান তার তার অনুযায়ী স্থিতিশক্তির মান নির্দেশ করে।

খ. বেগবিস্তার ঃ ৩-৬.৪ সমীকরণে $v_0=F/Z_m$ আর ৩-৪.৮এ $x_0=F/\omega Z_m$; সুতরাং (৩-৪.৭ থেকে)

$$\text{বেগবিস্তার } v_0=\omega x_0=\frac{\omega f}{[(\omega_0^2-\omega^2)^2+4k^2\omega^2]} \qquad (\text{৩-৯.৩})$$

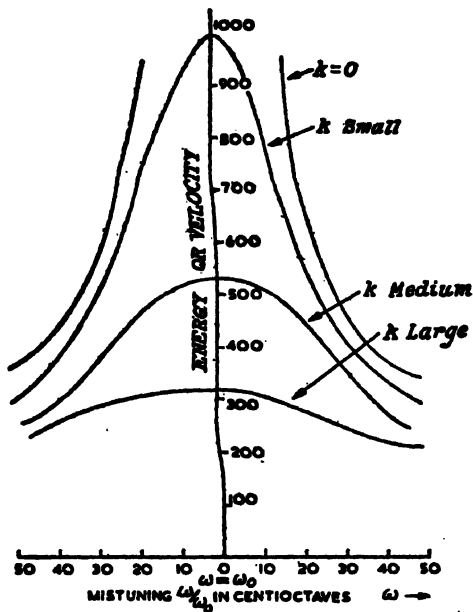
3.7 চিত্রে আগের মতোই ভিন্ন ভিন্ন মন্দনে স্পন্দনাংক এবং বেগবিস্তারের মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। এই প্রতিবেদন রেখাগুলির বৈশিষ্ট্যগুলি নিম্নলিখিত—

(১) সব মন্দনেই $\omega=\omega_0$ সাপেক্ষে প্রতিবেদন-বক্রগুলির সামঞ্জস্য রয়েছে

(২) প্রতিটি বক্রের শীর্ষই ঐ রেখার ওপর পড়েছে

(৩) অল্প মন্দনে বক্রশীর্ষ তীক্ষ্ণ বা সূক্ষ্ম, বেশী মন্দনে স্থূল, চাপা বা চৌরস (flat)

(৪) মন্দন না থাকলে (অবাস্তব ঘটনা) স্পন্দন অসীমবিস্তার হ'ত।

স্পন্দকের গতিশক্তি $mv^2/2$ ব'লে বক্ররেখাগুলি ভিন্ন ভিন্ন মন্দনে কম্পন সাপেক্ষে গতিশক্তির বণ্টনও নির্দেশ করে।

চিত্র 3.7—বেগ বা শক্তি-অনুনাদ

৩-১০. অনুনাদ :

পরবশ স্পন্দনে বিস্তার চরমমান হলে অনুনাদ ঘটেছে বলা হয়। বিস্তার তথা চূড়ান্ত মান—সরণের হতে পারে, বেগেরও হতে পারে ; 3.7 এবং 3.6 চিত্রে মোটামুটি $\omega=\omega_0$ রেখা বরাবর বা কাছাকাছি তাদের ঘটতে দেখা যাচ্ছে। তাই সরণ চূড়ান্তমান হলে **সরণ-অনুনাদ**, আর বেগ চরমমান হলে **বেগ-অনুনাদ** হয়েছে বলা হয়। তারা এক ঘটনা নয়, একই কম্পাংকেও হয় না। চরম বেগবিস্তারে স্পন্দকের গতিশক্তি সর্বাধিক ব'লে বেগ-অনুনাদকে **শক্তি-অনুনাদ**ও বলে। এই অনুনাদের গুরুত্ব বেশী—প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎধারায় এই ঘটনাকে (অর্থাৎ, চালক ও চালিতের কম্পাংক সমান) অনুনাদের সর্ত ব'লে ধরা হয়। এই কম্পাংকেই চালক থেকে সর্বাধিক ক্ষমতা চালিত স্পন্দকে হস্তান্তরিত হয়।

ক. সরণ-অনুনাদ : ওপরের নানা আলোচনা থেকে আমরা দেখেছি যে সরণবিস্তারের মান

$$x_0 = \frac{F}{\omega Z_m} = \frac{F/\omega}{[r^2 + (m\omega - s/\omega)^2]^{\frac{1}{2}}}$$

এই সমীকরণে একমাত্র চলক, স্পন্দনাংক ω ; সুতরাং সরণবিস্তার চরমমান হতে হলে এর হরের মান অবম হতে হবে ; অর্থাৎ

$$\frac{d}{d\omega}\left[r^2 + (m\omega - s/\omega)^2\right]^{\frac{1}{2}} \cdot \omega = 0 \qquad (৩\text{-}১০.১)$$

$$\therefore \quad \frac{d}{d\omega}\left[\omega^2 r^2 + (m\omega^2 - s)^2\right] = 0$$

অর্থাৎ, $2\omega r^2 + 2(m\omega^2 - s).\ 2m\omega = 0$*

এই সর্ত পূরণ হলে স্পন্দনাংক অনুনাদী হবে ; অর্থাৎ $\because\ (m\omega \neq 0)$

$$r^2 + 2(m\omega^2{}_R - s)m = 0$$

বা $$\omega_R{}^2 = \frac{sm}{m^2} - \frac{r^2}{2m^2} = \frac{s}{m} - 2\left(\frac{r}{2m}\right)^2 = \omega_0{}^2 - 2k^2 \qquad (৩\text{-}১০.২)$$

তাহলে দেখা যাচ্ছে অনুনাদী স্পন্দনাংক (ω_R) অদমিত স্পন্দনাংক (ω_0) বা মন্দিত স্পন্দনাংক ($\sqrt{\omega_0{}^2 - k^2}$) দুয়ের চেয়েই কম এবং মন্দনাংকের ওপর নির্ভর করে। তাই সরণবিস্তারের গাণিতীয় প্রতিরূপে, অনুনাদী স্পন্দনাংকের মান বসালে চরম সরণবিস্তার হবে

$$(x_0)_{max} = \frac{F}{\omega_R Z_m} = \frac{f}{[(\omega_R{}^2 - \omega_0{}^2)^2 + 4k^2\omega_R{}^2]^{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{f}{[(\omega_0{}^2 - 2k^2 - \omega_0{}^2)^2 + 4k^2(\omega_0{}^2 - 2k^2)]^{\frac{1}{2}}}$$

$$= \frac{f}{2k(\omega_0{}^2 - k^2)^{\frac{1}{2}}} \qquad (৩\text{-}১০.৩ক)$$

---

* একে দ্বিতীয় বার অবকলন করলে $12m\omega^2 - (4sm - 2r^2)$ পাই। সমীকরণের ডান দিক +ve ব'লে এটি অবম মান নির্দেশ করে।

$$=\frac{F/m}{(r/m)(s/m-r^2/4m^2)^{\frac{1}{2}}}=\frac{F}{r(s/m-r^2/4m^2)^{\frac{1}{2}}}$$

$$=\frac{2mF}{r(4sm-r^2)^{\frac{1}{2}}}=\frac{F}{k(4sm-r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (৩\text{-}১০.৩খ)$$

এই দুই সমীকরণ থেকেই দেখছি মন্দনাংক (k) তথা বাধা (r) যত বাড়ে চরম সরণবিস্তার $(x_0)_{max}$ ততই কমে ; তাতে অনুনাদী স্পন্দনাংক ($\sqrt{\omega_0^2-2k^2}$) তত কমে এবং তাই $\omega=\omega_0$ রেখা থেকে দূরে সরে যায়। স্পন্দকের স্থিতিশক্তি $\frac{1}{2}sx^2$ বলে $(x_0)_{max}$ চালিত স্পন্দকের চূড়ান্ত স্থিতিশক্তির মান নির্দেশ করে।

খ. বেগ তথা শক্তি-অনুনাদ ঃ আমরা ৩-৯.৩ সমীকরণ থেকে বেগ-বিস্তারের মান পাচ্ছি

$$v_0=\frac{\omega f}{[(\omega^2-\omega_0^2)^2+4k^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}}=\frac{F}{[(m\omega-s/\omega)^2+r^2]^{\frac{1}{2}}}$$

এখানেও ω একমাত্র চলরাশি ; তাহলে $m\omega=s/\omega$ হলেই সমীকরণ লঘিষ্ঠমান হবে এবং তখনই বেগবিস্তার (v_0) গরিষ্ঠমান হবে ; অর্থাৎ

$$(v_0)_{max}=F/r=F/2km=f/2k \quad (৩\text{-}১০.৪)$$

তাহলে বলতে পারি যে যান্ত্রিক প্রতিক্রিয়তা ($m\omega-s/\omega$) শূন্য হলেই বেগ তথা শক্তি-অনুনাদ ঘটে। প্রসঙ্গক্রমে সেই অবস্থায়, চালক স্পন্দনাংক চালিতের স্বকীয় স্পন্দনাংকের সমান।

$$\therefore \quad \text{অনুনাদী শক্তি } K_R=\tfrac{1}{2}m(v_0)_{max}^2=\frac{mF^2}{2r^2}=\frac{mF^2}{2(Z_m)_R^2}$$

$$(৩\text{-}১০.৫)$$

উদাহরণ ঃ দেখাও যে পরবশ স্পন্দনে স্থিতিশক্তি আর গতিশক্তির বিস্তার-অনুপাত চালিত ও চালক কম্পাংকের অনুপাতের বর্গের সমান।

সমাধান ঃ

$$V_{max}=\tfrac{1}{2}sx_0^2=\tfrac{1}{2}m\omega_0^2\frac{F^2}{\omega^2 Z_m^2}=\frac{mF^2}{2Z_m^2}\cdot\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$$

$$K_{max}=\tfrac{1}{2}m(v_0)^2_{max}=\tfrac{1}{2}\cdot\frac{mF^2}{r^2}=\frac{mF^2}{2Z_m^2}$$

$$\therefore \quad \frac{V_{max}}{K_{max}}=\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2=\left(\frac{n_0}{n}\right)^2$$

গ. অনুনাদে ক্ষমতা, কার্য ও দশার আলোচনা : চালক স্পন্দক থেকে হস্তান্তরিত গড় ক্ষমতার মান ৩-৮.৩ সমীকরণ থেকে পাই

$$\overline{P}=\tfrac{1}{2}F^2r/Z_m^2$$

শক্তি অনুনাদ হলে বাধে প্রতিক্রিয়তা লোপ পায় অর্থাৎ $(Z_m)_R=r$; তাহলে

$$P_R=\frac{1}{2}\frac{F^2}{r}=\frac{1}{2}\cdot\frac{m^2f^2}{r}=\frac{1}{2}\cdot mf^2\cdot\frac{m}{r}=\frac{1}{2}mf^2\tau=\frac{mf^2}{4k} \qquad (৩\text{-}১০.৬)$$

আবার $(Z_m)_R=r$ সর্ত ৩-৮.৫ সমীকরণে বসিয়ে **অনুনাদ অবস্থায়** বাধাবলের বিরুদ্ধে এক চক্রে যতখানি গড় কার্য হয় তার মাপ পাই—$F^2/2r$;

৩-৪.৫(খ)-তে আমরা চালক বল থেকে সরণের **বিলম্বদশা** পেয়েছি

$$\phi=\tan^{-1}\frac{2k\omega}{\omega_0^2-\omega^2}=\frac{2k}{(\omega_0^2/\omega)-\omega}$$

$$=\frac{r/m}{(s/m\omega)-\omega}=\frac{r}{s/\omega-m\omega} \qquad (৩\text{-}১০.৭)$$

অনুনাদে প্রতিক্রিয়তা $(s/\omega-m\omega)$ থাকে না, সুতরাং $\phi=90°$—সরণ, বল থেকে পাদবিলম্বী। আবার ৩-৬.৩ থেকে চালক বল ও বেগের মধ্যে দশাবিলম্ব $\theta=\tan^{-1}\frac{m\omega-s/\omega}{r}$; যেহেতু অনুনাদে প্রতিক্রিয়তা নেই, $\theta_R=0$ হবে অর্থাৎ চালক বল ও উৎপন্ন বেগ সমদশা হবে।

অনুনাদকালে সরণ যে, বল থেকে $\pi/2$ পেছিয়ে থাকে তার কারণ, চালিত স্পন্দকের শক্তিশোষণের হার চালক বল এবং উৎপন্ন সরণের মধ্যে দশাভেদের ওপর নির্ভর করে না, করে চালক বল এবং উৎপন্ন বেগের মধ্যে দশান্তরের ওপর। দোলনার কথা মনে কর—তার সরণ যখন শূন্য তখনই বেগ চরম। বেগ অর্জন করতে বেগের অভিমুখেই চরম বল প্রয়োগ করা চাই। যে যে বিন্দুতে দোলনার বেগ দিক্ পরিবর্তন করছে, অনুনাদ সৃষ্টি করতে সেই সেই বিন্দুতেই প্রযুক্ত বলেরও সমতালে দিক্ পরিবর্তন হওয়া দরকার—সেই সেই সময়ে সরণ চরমমাত্রা, বেগ অবমমাত্রা এবং সরণ ও বল পাদান্তরদশা, বল ও বেগ সমদশা।

৩-১১. স্পন্দন নিয়ন্ত্রণ :

৩-৪.৮(ক) সমীকরণ থেকে নিয়মিত পরবশ কম্পনে যেকোন নিমেষে

(ক) সরণ $x=\dfrac{F\cos(\omega t-\phi)}{\omega Z_m}=x_0\cos(\omega t-\phi)$;

$\therefore$ সরণবিস্তার $x_0=\dfrac{F}{\omega Z_m}$ (৩-১১.১ক)

(খ) বেগ $\dot{x}=\dfrac{-F\sin(\omega t-\phi)}{Z_m}=v_0\cos(\omega t-\phi+\pi/2)$

$\therefore$ বেগবিস্তার $v_0=\dfrac{F}{Z_m}$ (৩.১১.১খ)

(গ) ত্বরণ $\ddot{x}=\dfrac{-\omega F\cos(\omega t-\phi)}{Z_m}=-\omega^2 x$;

$\therefore$ ত্বরণবিস্তার $\ddot{x}_0=\dfrac{\omega F}{Z_m}$ (৩-১১.১গ)

সুতরাং নিয়মিত পরবশ কম্পনে সরণ, বেগ, ত্বরণ প্রতিটিরই বিস্তার, চালক কম্পাংক ($\omega/2\pi$) এবং যান্ত্রিক বাধ (Z_m) দিয়ে নিয়ন্ত্রিত। আবার Z_m তার প্রতিক্রিয়তা উপাংশটির জন্যও চালক কম্পাংকের ওপর নির্ভর করে।

যান্ত্রিক বাধের তিনটি উপাঙ্গ—দার্ঢ্য (s), রোধ (r) এবং ভর (m) ; চালক কম্পাংক সামান্য মান থেকে ক্রমে ক্রমে বাড়াতে থাকলে, এদের নিয়ন্ত্রণ ক্ষমতা পর পর কার্যকরী হতে থাকে। **নিম্ন কম্পাংকে** ($\omega\ll\omega_0$) স্পন্দন, স্পন্দকের কাঠিন্য তথা দার্ঢ্য ধর্ম (s) শাসিত, **তুলনীয় কম্পাংকে** ($\omega\simeq\omega_0$) স্পন্দন মাধ্যমের রোধ (r) শাসিত আর **উচ্চ কম্পাংকে** ($\omega\gg\omega_0$) স্পন্দন আবার স্পন্দকের ভর (m) তথা জড়তা-ধর্ম শাসিত। এই সিদ্ধান্তে পৌঁছতে আমরা দেখেছি সরণবিস্তার

$$x_0=\frac{F}{\omega Z_m}=\frac{F}{\omega[r^2+(m\omega-s/\omega)^2]^{1/2}}$$

$$=\frac{f}{[4k^2\omega^2+(\omega_0{}^2-\omega^2)^2]^{1/2}}$$

এখন মন্দিত দোলনে রোধ-গুণাংক (r) অল্পই ধরা হয়, কাজেই r^2 নগণ্য। সেক্ষেত্রে

(ক) স্পন্দকের স্বকীয় স্পন্দনাংক চালক স্পন্দনাংকের তুলনায় অনেক বেশী ($\omega_0 \gg \omega$) হলে $s/\omega \gg m\omega$ হবে অর্থাৎ $Z_m \to s/\omega$

$$\therefore \quad x_{0(\omega \ll \omega_0)} \to \frac{f}{\omega_0^2} = \frac{F/m}{s/m} = \frac{F}{s} \qquad (৩\text{-}১১.২)$$

অর্থাৎ স্পন্দকের সরণ তথা সাড়া (x_0) নিয়ন্ত্রণ করে স্পন্দকের প্রত্যানয়ক বা স্প্রিং গুণাংক অর্থাৎ তার দার্ঢ্যধর্ম (s)।

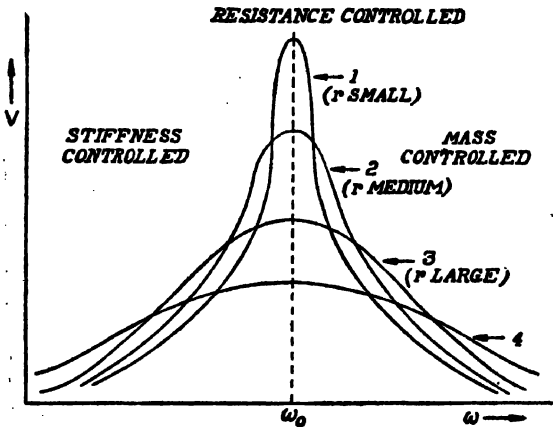
(খ) স্পন্দকের অদমিত কম্পাংক চালক কম্পাংকের সমান ($\omega = \omega_0$) বা কাছাকাছি হলে $(\omega_0^2 - \omega^2)^2 \simeq 0$ এবং তাহলে

$$(x)_{\omega_0 \simeq \omega} = \frac{f}{2k\omega_0} = \frac{mf}{r\omega_0} = \frac{F}{\omega_0 r} = \frac{F\tau}{\omega_0} \qquad (৩\text{-}১১.৩)$$

অর্থাৎ চালক কম্পাংক অনুনাদী কম্পাংকের কাছাকাছি হলে মাধ্যমের রোধাংক তথা শ্লথন-কালই স্পন্দনের নিয়ন্ত্রক।

(গ) স্পন্দকের নিজস্ব কম্পাংক চালক কম্পাংকের চেয়ে অনেক ছোট হলে ($\omega_0 \ll \omega$) আমরা পাব $m\omega \gg s/\omega$ এবং r ছোট ব'লে $Z_m \to m\omega$; সুতরাং r^2 বা $4k^2$ নগণ্য হওয়ায়

$$(x_0)_{\omega_0 \ll \omega} = \frac{f}{\omega^2} = \frac{F}{m\omega^2} \qquad (৩\text{-}১১.৪)$$

অতএব পরবশ স্পন্দনমাত্রেই স্বকীয় কম্পাংকের অনেক উর্ধ্বে ভরশাসিত,

চিত্র 3.8—স্পন্দনের নিয়ন্ত্রণ

অনুনাদে রোধশাসিত আর অনেক নিচে দার্ঢ্যশাসিত। 3.8 চিত্রে বেগবিস্তার ($v_0 = \omega x_0$) এবং চালক স্পন্দনাংকের (ω) মধ্যে এই সম্পর্ক ($v_0 = \omega F/s$, F/r, $F/m\omega$) দেখানো হয়েছে। বক্রগুলিতে (1) থেকে (4) পর্যন্ত মাধ্যমের রোধাংক (r) ক্রমে বেড়েছে।

স্পন্দননিয়ন্ত্রণে কম্পাংক বর্ণালীর (frequency spectrum) ভিন্ন ভিন্ন অংশে চালক কম্পাংকের ভূমিকা আলোচনা করলে দেখছি যে দার্ঢ্যশাসিত অঞ্চলে ৩-১১.২ অনুযায়ী সরণবিস্তার (x_0), রোধশাসিত অঞ্চলে ৩-১১.৩ অনুযায়ী বেগবিস্তার (ωx_0) এবং দার্ঢ্যশাসিত অঞ্চলে ৩-১১.৪ অনুসারে ত্বরণ বিস্তার ($-\omega^2 x_0$)—স্পন্দকের কম্পাংক নিরপেক্ষ। আলোচিত বিষয়বস্তু নিচে সারণীভূত করা হ'ল—

নিয়ন্ত্রক ধর্ম	কার্যকরী বাধ	নিয়ন্ত্রিত গতীয় রাশি	স্পন্দনাংক
দার্ঢ্য (s)	$Z_m \to s/\omega$	সরণ (x_0)$\to F/s$	$\omega \leqslant \omega_0$ বা $\omega \leqslant \sqrt{s/m}, s/r$
রোধ (r)	$Z_m \to r$	বেগ (v_0)$\to F/r$	$\frac{r}{m} < \omega > s/r$
জাড্য (m)	$Z_m \to m\omega$	ত্বরণ (a_0)$\to F/m$	$\omega \geqslant \sqrt{s/m}, r/m$

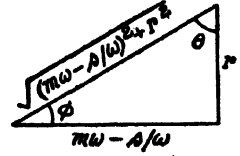
ভিন্ন ভিন্ন শ্রেণীর শাব্দযন্ত্রে ভিন্ন ভিন্ন অঞ্চলে কম্পাংক-নিরপেক্ষতা কাজে লেগেছে। কেননা এক এক শ্রেণীর যন্ত্র এক এক কম্পাংকপাল্লায় সাড়া দেবে এটাই কাম্য। যেমন অনুনাদী স্বনকের ক্ষেত্রে, যথা উচ্চারণকালে আমাদের মুখগহ্বর (১৭-৩ অনুচ্ছেদ), তারের বাদ্যযন্ত্রে স্পন্দনশীল তার বা xylophone বায়বযন্ত্রে স্পন্দনশীল পত্রী প্রভৃতিতে স্পন্দন মাধ্যমের রোধশাসিত। আবার মাইক্রোফোন বা লাউডস্পীকারের পর্দাকে মোটামুটিভাবে সব কম্পাংকেই সাড়া দিতে হবে তাই সে স্পন্দন তার ভর বা কাঠিন্যের ওপর নির্ভরশীল হবে।

৩-১২. পরবশ কম্পনে স্পন্দনদশা :

নিয়মিত পরবশ স্পন্দনে আমরা দেখি যে, সরণ বল থেকে ϕ কোণে

আর বেগ বল থেকে θ কোণে পেছিয়ে থাকে। ৩-৬.৫-ক আর ৩-৬.৩ থেকে তাদের মান যথাক্রমে পাচ্ছি

$$\tan\phi = \frac{r}{s/\omega - m\omega} = \frac{r}{-X_m}$$

এবং $$\tan\theta = \frac{m\omega - s/\omega}{r} = \frac{X_m}{r}$$

চিত্র 3.9—
বাধ ত্রিভুজ

এখন অনুনাদে, বেগ এবং বল সমদশা $(\theta = 0)$ কেননা $(m\omega - s/\omega)$ অর্থাৎ $X_m \to 0$ আর সরণ বলের পাদবিলম্বী $(\phi = \pi/2)$ সেই একই কারণে।

3.9 চিত্রে যান্ত্রিক বাধের ভিন্ন ভিন্ন উপাঙ্গগুলির সঙ্গে দশাকোণের মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। তা থেকে আমরা পাচ্ছি

(ক) $\theta + \phi = \pi/2$

(খ) $$\sin\phi = \frac{r}{[r^2 + (m\omega - s/\omega)^2]^{\frac{1}{2}}} = \frac{-2k\omega}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}}$$

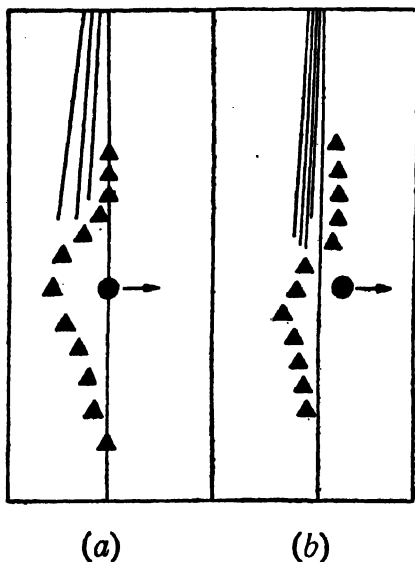
(গ) $$\cos\phi = \frac{m\omega - s/\omega}{[r^2 + (m\omega - s/\omega)^2]^{\frac{1}{2}}} = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}}$$

সুতরাং (১) $\omega \ll \omega_0$ হলে $\cos\phi \to 1$, $\sin\phi \to (-0)$; অর্থাৎ $\phi \to 0$ বা π ; অর্থাৎ সরণ এবং বল প্রায় সমদশা, নচেৎ প্রায় বিপরীতদশা।

(২) $\omega \simeq \omega_0$ হলে $\cos\phi \to (\pm\ 0)$, $\sin\phi \to (-1)$, কাজেই $\phi = -\pi/2$ অর্থাৎ সরণ বল থেকে এক সমকোণে পেছিয়ে থাকে।

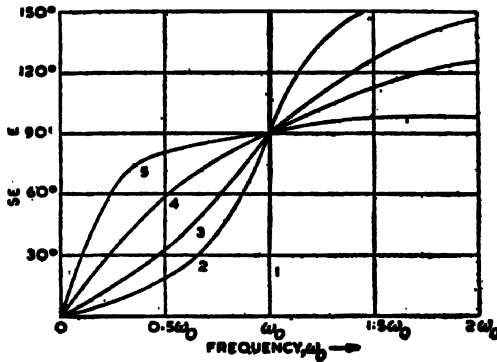
(৩) $\omega \gg \omega_0$ হলে $\cos\phi \to (-1)$, $\sin\phi \to 0$ এবং $\phi = -\pi$; অর্থাৎ কম্পাংক খুব কম মান থেকে ক্রমশ বাড়তে থাকলে দশাবিলম্ব 0 থেকে বাড়তে বাড়তে অনুনাদে $\pi/2$ হয় এবং শেষ পর্যন্ত π-এর কাছাকাছি আসে। সবক্ষেত্রেই r-এর মান তথা রোধ কম।

সংক্ষেপে বলা চলে **সামান্য রোধে চালক-কম্পাংক স্পন্দক-কম্পাংক সাপেক্ষে অনেক কম বা অনেক বেশী হলে সরণ চালকবলের সমান বা বিপরীতদশার খুব কাছাকাছি আর দুই কম্পাংক কাছাকাছি হলে সরণ পাদবিলম্বী হয়।**

পূর্ববর্ণিত বার্টনের শংকু-দোলকগুলির পরবশ কম্পনে তাদের দৈর্ঘ্য তথা কম্পাংক ($n \propto 1/l$) এবং চালকদোলকের সাপেক্ষে স্পন্দনদশার সম্পর্ক 3.10 চিত্রে দেখানো হয়েছে। (a) চিত্রে সেই দোলক যে মুহূর্তে বাঁ থেকে ডান দিকে সাম্যবিন্দু অতিক্রম ক'রে যাচ্ছে, সেই নিমেষে চালিত দোলকগুলির

চিত্র 3.10—চালক ও চালিতের মধ্যে দশাসম্পর্ক

অবস্থান দেখানো হয়েছে। হ্রস্বতর ও দীর্ঘতর দোলকগুলির কম্পাংক চালক-দোলকের তুলনায় যথাক্রমে বেশী এবং কম। তাদের অনেককেই খাড়ারেখা বরাবর থাকতে দেখা যাচ্ছে—অর্থাৎ তারা সম বা বিপরীত দশায় রয়েছে। (b) চিত্রে সামান্য পরে তাদের অবস্থান দেখানো হয়েছে—হ্রস্বতর দোলকগুলি ডাইনে গেছে অর্থাৎ তারা চালকের অনুগামী আর দীর্ঘতরগুলি গেছে বাঁয়ে, তারা বিপরীতমুখী; সমদৈর্ঘ্য অর্থাৎ অনুনাদী দোলক সর্বাধিক পেছিয়ে। আংটি পরিয়ে দোলকদের ভারী করলে মন্দন আরও কমে যাবে, তখন সম-বা বিপরীত-মুখী দোলকগুলির অবস্থান খুবই কাছাকাছি থাকবে।

3.11 চিত্রে ভিন্ন ভিন্ন রোধাংকে চালক স্পন্দনাংক (ω) এবং সরণে দশাবিলম্ব (ϕ)—এই দুয়ের মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। প্রতি ক্ষেত্রেই খুব কম কম্পাংকে ($\omega \rightarrow 0$) দশাবিলম্ব শূন্য এবং অনুনাদী কম্পাংকে দশাবিলম্ব

$\pi/2$; কিন্তু চালক-কম্পাংকের ভিন্ন ভিন্ন মন্দনে (অর্থাৎ 1 থেকে 4 চিহ্নিত রেখাগুলি বরাবর) দশাভেদ আলাদা আলাদা। যতক্ষণ $\omega < \omega_0$, বল ও সরণ অনুমুখী ($\phi < \pi/2$) ; আর $\omega > \omega_0$ হওয়ামাত্রেই দশাবৈপরীত্য

চিত্র 3.11—রোধাংকভেদে স্পন্দনাংক ও দশাভেদ

এসে পড়ে—তারা বিপরীতমুখী। 3.10 চিত্রে এই সিদ্ধান্ত সমর্থিত। মন্দন যত প্রবল, দশা পরিবর্তনের হার তত ধীর ; মন্দন যত লঘু, দশা পরিবর্তনের হার তত দ্রুত বা খর।

৩-১৩. অনুনাদ-খরতা (Sharpness of Resonance) :

অনুনাদী কম্পাংক থেকে চালক কম্পাংক যত সরে যায় ততই চালিত স্পন্দকের সাড়া কমে যায়। দুই কম্পাংকের অনুপাত ω/ω_0 এক থেকে সরে গিয়ে 1-এর বেশী বা কম হলে তাকে বে-তান (mistuning) বলতে পারি। বে-তান যত বাড়ে সাড়া তত কমে ; যে হারে এই সাড়া কমে তাই দিয়ে অনুনাদ-খরতা মাপা হয়।

3.7 এবং 3.8 দুই চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে, প্রতিবেদন-রেখার পতন-হার মন্দন-নির্ভর। মন্দন যত কম অনুনাদ-খরতা তত বেশী। $\omega = \omega_0$ মানে সাড়া সব মন্দন-গুণাংকেই সর্বাধিক, (ω/ω_0) যত বাড়ে বা কমে, সাড়া তত কমে ; মন্দন-গুণাংক যত বাড়ে সাড়া কমার হারও তত কমে। অনুনাদে চূড়ান্ত সরণবিস্তার $f/2k\omega$ এবং বেগবিস্তার $f/2k$; অর্থাৎ দমন না থাকলে সরণ বা বেগ অসীমমান হ'ত। অনুনাদের কাছাকাছি কম্পাংকে স্পন্দনীনিয়ন্ত্রণে রোধের ভূমিকাই মুখ্য হয়ে থাকে (3.8 চিত্র)।

অনুনাদ-খরতা এবং মন্দন-বল : মন্দন দুর্বল হলে অনুনাদ খর, বা তীক্ষ্ণ আর জোরালো হলে তা যে ভোঁতা বা নিরেস হয় তা আমরা দুটি সহজ পরীক্ষা থেকে বুঝতে পারি।

সটান তারের স্পন্দনে দমন খুবই সামান্য, কেননা সে সামান্য পরিমাণ বায়ু স্থানচ্যুত করে ব'লে ঘর্ষণে অবক্ষয় কম, তাই তার স্পন্দন দীর্ঘস্থায়ী। অপরদিকে কোন নলে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন স্বল্পস্থায়ী (শাঁখে বা হুইশ্‌লে ফুঁ দেওয়া বন্ধ করলেই শব্দ থেমে যায়) কেননা তার ওপরে ঘর্ষণবাধা অনেক বেশী। সটান তার এবং অনুনাদী নলে অনুনাদ সৃষ্টি করা সহজ।

(১) সনোমিটার প্রধানত একটা লম্বা ফাঁপা কাঠের বাক্স—তার ওপরে টানা-দেওয়া স্পন্দনক্ষম তার (12.6 চিত্রে) আর তারের তলায় প্রিজম্‌ আকারের দুটি কাঠের সেতু থাকে। সেতু-দুটিকে নড়ানো চলে এবং তাদের মধ্যে ব্যবধান স্পন্দনশীল তারের দৈর্ঘ্য ; তারের কম্পাংক এই দৈর্ঘ্যের ওপর নির্ভর করে। স্পন্দনশীল সুরশলাকা সনোমিটার বোর্ডের ওপর চেপে ধরলে তারের পরবশ কম্পন হয়। তারের ওপর ছোট্ট একটুকরো কাগজ সোয়ার (rider) হয়ে থাকে। দুই সেতুর ব্যবধান বদ্‌লে পরবশ স্পন্দনকে অনুনাদী অবস্থায় আনলেই জোরালো সরণের ফলে কাগজ ছিট্‌কে পড়ে যায়। কিন্তু সেই দৈর্ঘ্য সামান্য কমবেশী হলেই স্পন্দনবিস্তার এত কমে যায় যে কাগজ আর পড়ে না। সুতরাং **দুর্বল মন্দনে স্পন্দন-বিস্তার-হ্রাস অত্যন্ত দ্রুত, অনুনাদ খর।**

(২) একটা মোটা কাচের সিলিণ্ডারে জল দিয়ে তার মধ্যে অপেক্ষাকৃত সরু নল ডুবিয়ে অনুনাদী নল করা হয়। তার মাথার কাছে স্পন্দনশীল সুরশলাকা ধরলে আবদ্ধ নলে বায়ুস্তম্ভের পরবশ স্পন্দন হয়। এর দৈর্ঘ্য বদ্‌লে অনুনাদ আনা হয়—তখন জোরে শব্দ হয়। নল উঠিয়ে-নামিয়ে দৈর্ঘ্য বাড়িয়ে-কমিয়ে বায়ুস্তম্ভের কম্পাংক কমালে-বাড়ালেও বেশ খানিকটা দৈর্ঘ্য জুড়েই শব্দ শোনা যায় অর্থাৎ সাড়া তথা সরণবিস্তার খুব কমে না—অর্থাৎ, অনুনাদ ভোঁতা বা নিরেস ; আমরা আগেই দেখেছি বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনে মন্দন জোরালো। আবার, কোন দৈর্ঘ্যে অনুনাদ হলে সেই সুরশলাকাটির কাছাকাছি কম্পাংকের অন্য সুরশলাকা বাজলেও বেশ শব্দ শোনা যাবে।

বার্টনের দোলক পরীক্ষাতে দমন কমবেশীতে, স্পন্দনবিস্তার পরিবর্তনের খর (3.3*a* চিত্র) এবং ধীর (3.3*b* চিত্র) হার দেখানো হয়েছে।

তাহলে পরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে, কোন স্পন্দকের ওপর তার নিজস্ব কম্পাংকের কাছাকাছি কম্পাংকের স্পন্দন আরোপ করলে (ক) মন্দন জোরালো হলে সব কম্পাংকেই যথেষ্ট সাড়া মিলবে আর (খ) দুর্বল মন্দনে একটি অর্থাৎ কেবল অনুনাদী কম্পাংকেই যথেষ্ট সাড়া পাওয়া যাবে। তাই বলা হয় যে আরোপিত কম্পাংকশ্রেণী থেকে অনুনাদী কম্পাংক বেছে নেওয়ার, অর্থাৎ নির্বাচন করার ক্ষমতা (selectivity) দুর্বল মন্দনে বেশী, জোরালো মন্দনে অল্প। নির্বাচন-ক্ষমতা কথাটা বেতারসংকেত-গ্রহণের পরিভাষা থেকেই নেওয়া।

বেতারসংকেত-গ্রহণে অনুনাদ-খরতা: তোমরা হয়তো দেখেছ যে দামী রেডিও সেটে চাবি সামান্য ঘোরালেই কোন স্টেশন থেকে ধরা সংকেত আর মোটেই শোনা যায় না; অথচ সস্তা সেটে সে অসুবিধা তো হয়ই না, পরন্তু কাছাকাছি কম্পাংকের স্টেশন থেকে একাধিক সংকেত একসঙ্গেই শোনা যায়; অর্থাৎ প্রথম ক্ষেত্রে অনুনাদ-খরতা বেশী, দ্বিতীয় ক্ষেত্রে কম। সেটের মধ্যে দোল-বর্তনীতে বৈদ্যুতিক রোধের তারতম্যই এই আচরণের জন্য দায়ী।

২-৭ অনুচ্ছেদে আমরা বলেছি L-C-R শ্রেণীসজ্জিত বর্তনী, বেতার-সংকেত প্রেরণের প্রথম ধাপ, তাতে বৈদ্যুতিক আধানের ক্ষয়িষ্ণু দোলন বেতারতরঙ্গ সৃষ্টি করে। বেতারগ্রাহকে অনুরূপ বর্তনী থাকে; তাতে চাবি ঘুরিয়ে ধারকত্ব বদ্‌লে বদ্‌লে অনুনাদ আনা হয়। এই বর্তনীতে স্পন্দনাংকের মান

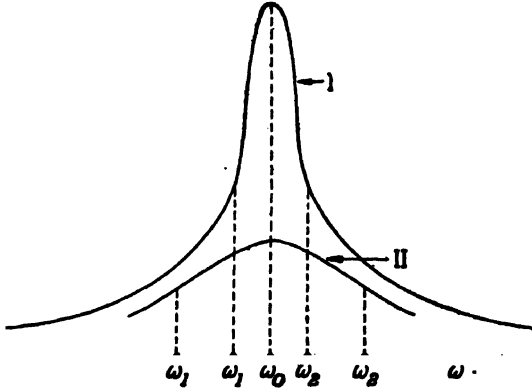
$$\omega = (1/LC - R^2/4L^2)^{1/2}$$

অর্থাৎ R-এর মান L সাপেক্ষে যতই কমবে ω ততই অদমিত তথা স্বভাবী কম্পাংকের ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$) দিকে এগোবে। দামী সেটে choke coil-এর রোধ কমই থাকে তাই অনুনাদে স্পন্দনদমন সামান্যই হয়। কাজেই তার নির্বাচন-ক্ষমতা তথা অনুনাদ-খরতা তীক্ষ্ণ। পক্ষান্তরে সস্তা সেটের চোক্ কুণ্ডলীতে রোধ বেশী তাই তার নির্বাচন-ক্ষমতা তুলনায় নিরেস।

৩-১৪. অনুনাদ-খরতার গাণিতীয় বিশ্লেষণ:

স্পন্দনাংকের সঙ্গে শক্তির পরিবর্তন বা বেগের পরিবর্তন ভিন্ন ভিন্ন মন্দন বলের ক্রিয়াধীনে কিভাবে হয় যথাক্রমে 3.7 এবং 3.8 চিত্রে দেখানো হয়েছে। তা থেকে মন্দনভেদে অনুনাদ-খরতার রূপরেখার আন্দাজ মেলে। স্পন্দনাংকের সঙ্গে সাড়া-বদলের লেখচিত্র অন্য নানা ভাবেই টানা যায়;

3.12 চিত্রে স্পন্দনাংকের সঙ্গে শক্তিসরবরাহের হার তথা ক্ষমতার সম্পর্ক এবং পরের ছবিতে ভিন্ন ভিন্ন স্পন্দনাংকে স্পন্দকের শক্তি/ অনুনাদে শক্তি (E_ω/E_R) এই অনুপাতের মান দেখানো হয়েছে। চিত্ররূপ প্রতিক্ষেত্রেই সদৃশ।

চিত্র 3.12—মন্দনভেদে অনুনাদ-খরতা

ক. অনুনাদ-খরতা, অর্ধক্ষমতা-কম্পাংক ও উৎকর্ষ অনুপাত : অনুনাদী কম্পাংকের (ω_0) চেয়ে বেশী (ω_2) এবং কম কোন স্পন্দনাংকে (ω_1) স্পন্দকের সাড়া তার অনুনাদী মানের অর্ধেক হবে। সেই দুই স্পন্দনাংকের নাম অর্ধক্ষমতা (half power) স্পন্দনাংক এবং তাদের অন্তরফলকে $(\omega_2-\omega_1)$ বন্ধনী-প্রস্থ (bandwidth) বলে। অনুনাদী স্পন্দনাংক এবং বন্ধনীপ্রস্থের অনুপাতকে অনুনাদ-খরতার পরিমাপক ব'লে ধরা যায় ; তাহলে

$$\text{অনুনাদ-খরতা } S=\frac{\omega_0}{\omega_2-\omega_1} \qquad (৩\text{-}১৪.১)$$

এখন ৩-৮.৩ এবং ৩-১০.৬ থেকে

$$\overline{P}=\frac{F^2r}{2Z_m^2} \text{ এবং } P_R=\frac{F^2r}{2r^2}=\frac{F^2}{2r}$$

তাহলে স্পন্দকের ক্ষমতা যখন অনুনাদী ক্ষমতার অর্ধেক তখন

$$P_1=\frac{1}{2}P_R\,;\text{ বা }\frac{F^2r}{2Z_m^2}=\frac{F^2}{4r}\text{ বা }Z_m^2=2r^2 \qquad (৩\text{-}১৪.২)$$

$Z_m^2=r^2+X_m^2$; সুতরাং ৩-১৪.২ থেকে $X_m=\pm r$;

আবার সংজ্ঞানুসারে $X_m = m\omega - s/\omega$

$$\therefore \quad m\omega_1 - s/\omega_1 = -r \text{ এবং } m\omega_2 - s/\omega_2 = +r$$

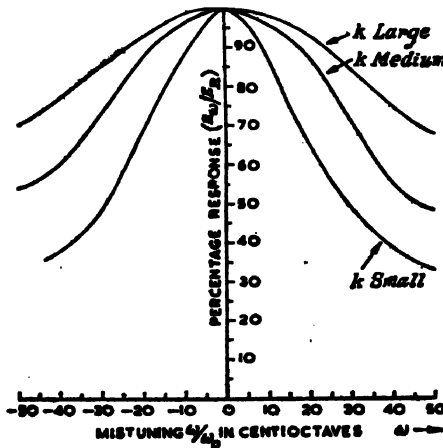
$$\therefore \quad \omega_2 - \omega_1 = r/m = 2k$$

অতএব $$S = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\omega_0}{2k} \qquad (৩\text{-}১৪.৩)$$

এই সমীকরণ বলছে যে অনুনাদ খর পেতে হলে স্পন্দকের স্বকীয় কম্পাংক বেশী এবং স্পন্দনে মন্দন কম হওয়া চাই। 3.12 চিত্রে অনুনাদ-খরতার সঙ্গে বন্ধনীপ্রস্থের সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। I চিহ্নিত বক্রে $(\omega_2 - \omega_1)$ তুলনায় কম অর্থাৎ মন্দন কম, বন্ধনীপ্রস্থ ক্ষীণ, অনুনাদ-খরতা তীক্ষ্ণতর ; II চিত্রে বন্ধনীপ্রস্থ প্রশস্ত, অর্থাৎ মন্দন বেশী সুতরাং অনুনাদ-খরতা কম।

২-৫.৮ সমীকরণে দেখেছি যে দুর্বল মন্দনে উৎকর্ষ অনুপাত

$$Q \simeq \omega_0 \tau = \frac{\omega_0}{2k} = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = S \qquad (৩\text{-}১৫.৪)$$

অর্থাৎ উৎকর্ষ-অনুপাত দিয়ে সরাসরি অনুনাদ-খরতা মাপা যায়।

চিত্র 3.13—বে-তান ও অনুনাদ-খরতা

খ. অনুনাদ-খরতা এবং স্পন্দকের শক্তি : বিকল্প এক পন্থায় কোন স্পন্দনাংকে (ω) এবং অনুনাদী স্পন্দনাংকে স্পন্দকের শক্তি অনুপাত

(E_ω/E_R) এবং স্পন্দনাংকের লেখচিত্র এঁকে অনুনাদ-খরতা প্রকাশ (3.13 চিত্র) করা সম্ভব। কেননা

$$\frac{E_\omega}{E_R} = \frac{\frac{1}{2}m(v_0)_\omega^2}{\frac{1}{2}m(v_0)_R^2} = \frac{\text{কোন কম্পাংকে বেগবিস্তারের বর্গ}}{\text{অনুনাদী কম্পাংকে বেগবিস্তারের বর্গ}} \quad (৩\text{-}১৪.৫ক)$$

$$= \frac{\omega^2 f^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2} \div \frac{f^2}{4k^2}$$

[৩-৯.৩ এবং ৩-১০.৪ থেকে]

$$= \frac{4k^2\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4k^2\omega^2} = \frac{4k^2}{\omega_0^2(\omega_0/\omega - \omega/\omega_0)^2 + 4k^2}$$

$$= \frac{4k^2}{\Delta^2 + 4k^2} \quad (৩\text{-}১৪.৫খ)$$

অনুনাদ হলে $E_\omega/E_R = 1$ হবে। 3.13 চিত্রে বিভিন্ন মন্দন-বলে $E_\omega/E_R - \omega$ সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। অনুনাদের বেলায় প্রত্যেকের শীর্ষমান সমান, কিন্তু মন্দনবল যত কম, বক্রে উত্থান-পতন ততই খাড়া। অনুনাদ-খরতার চেহারা এখানে আরও পরিস্ফুট। অনুনাদী স্পন্দনাংক থেকে যতটা বে-তানে (ω_0/ω) শক্তি-অনুপাত অর্ধেক হয় তাই দিয়ে অনুনাদ-খরতা মাপা যায়। সুতরাং

$$\frac{E_\omega}{E_R} = \frac{4k^2}{\Delta^2 + 4k^2} = \frac{1}{2} \quad (৩\text{-}১৪.৬)$$

$$\therefore \quad \Delta^2 + 4k^2 = 8k^2 \text{ অর্থাৎ } \Delta = \omega_0\,(\omega_0/\omega - \omega/\omega_0) = \pm 2k$$

$$\text{বা} \quad \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} = \pm 2k$$

$$\text{বা} \quad \omega^2 = \omega_0^2 \pm 2k\omega \; = \omega_0^2\,(1 \pm 2k\omega/\omega_0^2)$$

$$\therefore \quad \frac{\omega}{\omega_0} = \left(1 \pm 2k\omega/\omega_0^2\right)^{\frac{1}{2}} \simeq \left(1 \pm \frac{k\omega}{\omega_0^2}\right)$$

$$\text{বা} \quad \omega = \omega_0 \pm \frac{k\omega}{\omega_0} \quad \text{বা} \quad \omega_0 = \omega\,(1 \mp k/\omega_0)$$

$$\therefore \quad \frac{\omega_0}{\omega} = \left(1 \mp \frac{k}{\omega_0}\right) \quad (৩\text{-}১৪.৭)$$

অর্থাৎ বে-তান যদি অনুনাদী কম্পাংক থেকে k/ω_0 কম বা বেশী হয় তাহলে স্পন্দনসাড়ার মান ক'মে অর্ধেক হয়; অর্থাৎ k/ω_0-কে অনুনাদ-খরতার মাপ

ধরা যায়। এর মান যত ছোট (অর্থাৎ অদমিত কম্পাংক বেশী, মন্দন কম) অনুনাদ ততই খর। এই সিদ্ধান্ত আগের সিদ্ধান্তের সঙ্গে অভিন্ন।

প্রশ্নমালা

১। পরবশ কম্পনের অচির ও নিয়ত রূপ বলতে কি বোঝ বিস্তারিত-ভাবে বল। এদের গণিতীয় বিশ্লেষণ উপস্থাপিত কর।

২। মন্দিত স্পন্দকের পরবশ স্পন্দনের তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা লেখ। অনুনাদ-খরতা কাকে বলে? তীক্ষ্ণ ও নিস্তেজ প্রতিবেদনের উদাহরণ দাও। তাদের ব্যবহারিক প্রয়োজনের আলোচনা কর।

৩। পরবশ স্পন্দনে ভিন্ন ভিন্ন বিরোধী বলের ভূমিকা ব্যাখ্যা কর। দেখাও যে মন্দন যত কম হয় ততই স্পন্দকের স্বভাবী কম্পাংক ও প্রযুক্ত পর্যাবৃত্ত বলের কম্পাংকে সামান্য তফাৎ, স্পন্দনবিস্তারের মানকে ততই বেশী প্রভাবিত করতে পারে এবং বিপরীতক্রমে।

৪। মন্দিত দোলকে (ক) আদি মুহূর্তে ধাক্কা দেওয়া হ'ল, (খ) দীর্ঘকাল ধ'রে পর্যাবৃত্ত বল ক্রিয়া ক'রল। দুই ক্ষেত্রে গতিপ্রকৃতি আলোচনা কর।

৫। একটিমাত্র স্বাতন্ত্র্যসংখ্যায় দোলায়মান মন্দিত দোলকের সমঞ্জস বলের ক্রিয়ায় কি গতি হবে? বিস্তারিত ব্যাখ্যা দাও। (ক) স্বল্প মন্দনে, (খ) বেশী মন্দনে স্পন্দনবিস্তার চরম করতে হলে, প্রযুক্ত বলের কম্পাংক কি কি হবে, বার কর।

৬। নিয়মিত পরবশ দোলনের স্পন্দনাংক প্রযুক্ত স্পন্দনাংকের সমান— প্রমাণ কর। N_1 এবং N_2 যদি স্পন্দকের অর্ধক্ষমতা স্পন্দনাংক এবং N_0 তার অদমিত স্পন্দনাংক হয় তাহলে দেখাও যে $N_1 N_2 = N_0^2$।

৭। একটি টেলিফোন পর্দার কার্যকরী ভর 1 গ্রাম; তার ওপর প্রত্যানয়ক বল 10^7 ডাইন/সেমি, মন্দন বল 4000 ডাইন/ সেমি/সে, চালক বল $10^5 \cos \omega t$ ডাইন, একযোগে সক্রিয় থাকলে যান্ত্রিক বাধ, যান্ত্রিক প্রতিক্রিয়তা, সম্ভবপর চরম বিস্তার ও বেগ বার কর।

৮। m কার্যকরী ভরের সরল দোলকের পর্যায়কাল $2\pi/\omega$; প্রযুক্ত বাধাবল $2kmv$ এবং $p \sin pt$ নিয়তমানের চালক বল হলে চরম স্পন্দনবিস্তারের সর্ত কি?

দেখাও যে $p = \omega$ এবং $p^2 = \omega^2 - 4k^2$ হলে স্পন্দনবিস্তার সমান।

৩-১৫. অসমঞ্জস দোলন (Anharmonic vibrations) :

১-২ অনুচ্ছেদে আলোচনা প্রসঙ্গে আমরা দেখেছি যে সরণ-নির্ভর প্রত্যানয়ক বলের সার্বিক গণিতীয় ব্যঞ্জক

$$P = f(x) = -(s_0 + s_1 x + s_2 x^2 + s_3 x^3 + \cdots)$$

$x=0$ অর্থাৎ সরণ না হলে প্রত্যানয়ক বলও থাকে না, সুতরাং $s_0 = 0$; s_1, $s_2 \cdots$ এরা দ্রুতক্ষয়িষ্ণু সহগ। x স্বল্পমান হলে $P_1 = -s_1 x$; তখন x এর চিহ্ন বদ্‌লালে প্রত্যানয়ক বলেরও দিক্ বদলায়, তখন গতি সরল দোলজাতীয়। x-এর মান আর একটু বড় হলে $P_2 = -(s_1 x + s_2 x^2)$ হবে ; তখন x-এর দিক্‌চিহ্ননির্বিশেষে x^2 পজিটিভ, কাজেই P আর x-এর সঙ্গে সমানুপাতিক থাকবে না এবং দোলন অরৈখিক বা অসমঞ্জস হবে। তার অর্থ, প্রত্যানয়ক বলের ক্রিয়ায় স্পন্দকের সরণ তার সাম্য অবস্থানের একদিকে বেশী, অন্যদিকে কম হবে—স্পন্দন একপেশে তথা অসমঞ্জস হয়ে দাঁড়াবে।

তখন গতীয় সমীকরণ হয়ে দাঁড়াবে

$$P = f(x) = -s_1 x - s_2 x^2$$

$$\text{বা} \quad m\ddot{x} + s_1 x + s_2 x^2 = 0$$

$$\text{বা} \quad \ddot{x} + \omega_0^2 x + \alpha x^2 = 0 \qquad (৩\text{-}১৫.১)$$

এর সমাধান করতে আমরা র‍্যালের অনুসৃত আসন্নায়ন (approximation) পদ্ধতিতে এগোবো। তাতে প্রথমে αx^2 রাশিটি অগ্রাহ্য করা হয়। তখন সরল দোলনের সমীকরণ পাচ্ছি এবং

$$x = x_0 \cos(\omega_0 t - \phi)$$

$$\therefore \quad \alpha x^2 = \alpha x_0^2 \cos^2(\omega_0 t - \phi)$$

$$= \tfrac{1}{2}\alpha x_0^2[(1 + \cos 2(\omega_0 t - \phi))]$$

$$= \tfrac{1}{2}\alpha x_0^2 + \tfrac{1}{2}\alpha x_0^2 \cos 2(\omega t - \phi)$$

αx^2-এর এই মান এবারে ৩-১৫.১-এ বসালে পাব

$$\frac{d^2}{dt^2}\left(x + \frac{1}{2}\frac{\alpha x_0^2}{\omega_0^2}\right) + \omega_0^2\left(x + \frac{1}{2}\frac{\alpha x_0^2}{\omega_0^2}\right)$$

$$= -\tfrac{1}{2}\alpha x_0^2 \cos 2(\omega_0 t - \phi) \qquad (৩\text{-}১৫.২)$$

[$\frac{1}{2}\alpha x_0^2/\omega_0^2$ রাশিটি ধ্রুবক, সুতরাং তার অবকলন ফল শূন্য ; তাই প্রথম রাশিতে সে থাকতে পারে]। ৩-১৫.২ পরবশ স্পন্দনের অবকল সমীকরণ ; তাই তার সমাধানে পাব

$$\left(x+\frac{\alpha x_0^2}{2\omega_0^2}\right)=-\frac{\alpha x_0^2}{6\omega_0^2}\cos 2(\omega_0 t-\phi)$$

$$\therefore \quad x=-\frac{\alpha x_0^2}{2\omega_0^2}+x_0\cos(\omega_0 t-\phi)-\frac{\alpha x_0^2}{6\omega_0^2}\cos 2(\omega_0 t-\phi) \tag{৩-১৫.৩}$$

দেখা যাচ্ছে (১) সমাধানের প্রথম রাশিটি সাম্য অবস্থানেরই ধ্রুবমান সরণ, (২) দ্বিতীয় রাশিটি সমকম্পাংক প্রাথমিক স্পন্দনের উপস্থিতি এবং (৩) তৃতীয় রাশিটি দ্বিগুণ কম্পাংকের নতুন এক স্পন্দনের উৎপত্তি যথাক্রমে সূচিত করছে। α স্বল্পমান হওয়ায় প্রথম ও তৃতীয় রাশি দুটিই ছোট হয়।

এইজাতীয় দুই দোলনের সমাপতনে স্পন্দকে যুক্তস্বনের (১১-৮) উৎপত্তি হয়। সরণের মান আর একটু বাড়ালে $-s_3x^3$ রাশিটির ভূমিকা বিবেচনা করতে হয়। সাধারণত শব্দের আলোচনায় তার দরকার হয় না।

প্রত্যাবর্তী ধারাবাহী বৈদ্যুতিক বর্তনীতে অনুরূপ অরৈখিক অবস্থা আরোপ করা যায়। তখন বর্তনীতে প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ প্রয়োগ করলে তার একটি সরল ($d.\ c.$) অংশ $\alpha x_0^2/2\omega_0^2$ উৎপন্ন হয়।

মন্দিত দোলকের ভর, রোধ বা দার্ঢ্য যেকোন আঙ্গিকে প্রত্যাবর্তী ভেদ (modulation) ঘটিয়ে তার মূলকম্পাংকের অবমেল (subharmonics) উৎপন্ন করা সম্ভব। তেমনই ω_0 স্পন্দনাংকের কোন RLC বর্তনীতে C ধারকের দুই পাতের মধ্যে দূরত্ব $2(\omega_0/2\pi)$ কম্পাংকে বদলাতে থাকলে, স্বল্পমান রোধের বেলায় আধানের গতীয় সমীকরণ দাঁড়ায়

$$\ddot{Q}+(R/L)\dot{Q}+(Q/LC)(1-\sin 2\omega_0 t)=0$$

এখানে প্রযুক্ত বিভবভেদের স্পন্দনাংক, বর্তনীর স্বভাবী স্পন্দনাংকের দ্বিগুণ ($2\ \omega_0$) হওয়া চাই। এইভাবে উচ্চতর ও নিম্নতর সমমেল উৎপাদনকে **আঙ্গিক পরিবর্ধন** (parametric amplification) বলে।

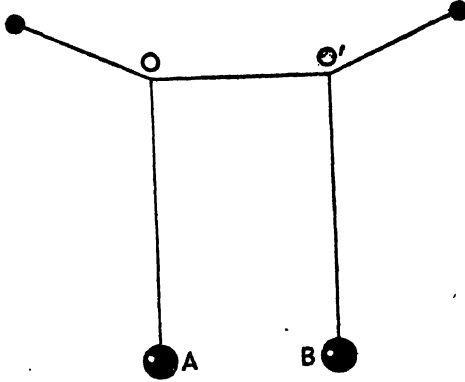
৪
যুগ্ম স্পন্দন
(Coupled Vibration)

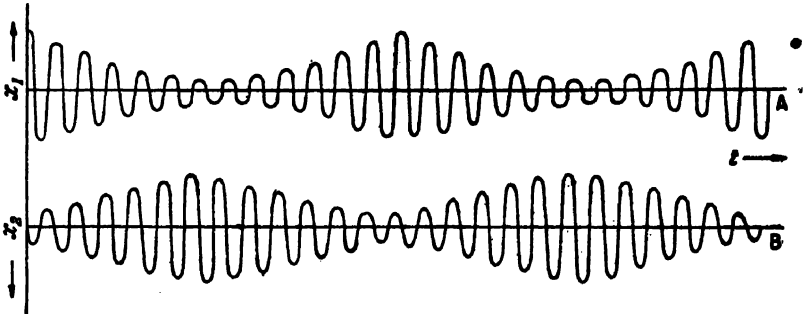
৪-১. যুগ্ম স্পন্দন :

৩-৯ অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে পরবশ কম্পন যুগ্ম স্পন্দনেরই এক বিশেষ ক্ষেত্র। পরবশ কম্পন বজায় রাখতে বাইরের এক উৎস থেকে শক্তি সরবরাহ করা দরকার। যদি দুয়ের যোগসূত্র খুব ক্ষীণ হয় বা উৎসের শক্তির ভাণ্ডার খুব বেশী হয় তাহলে একটি সম্পূর্ণ কম্পনে গড় শক্তির প্রবাহ চালক থেকে চালিতের দিকেই হয়। এই দুই সর্ত পূর্ণ না হলে শক্তি-প্রবাহ দ্বিমুখী হবে অর্থাৎ ক্রমপর্যায়ে তাদের মধ্যে শক্তির বিনিময় ঘটবে ; তখন চালক ও চালিতের ভূমিকার পর্যায়ক্রমে পালাবদল হতে থাকবে। **যুগ্ম স্পন্দন** বলতে আমরা দুই সমঞ্জস স্পন্দকের মধ্যে স্পন্দনশক্তির পর্যায়ক্রমিক শক্তি-বিনিময় বুঝব এবং সেই দুই স্পন্দকের যৌথ সংস্থাকে যুগ্ম স্পন্দকসংস্থা বলবো। স্পন্দকমাত্রেই কোন না কোন সূত্রে উৎসের সঙ্গে যুক্ত সুতরাং যেকোন স্পন্দনকেই যুগ্ম স্পন্দন ব'লে ধরা যায়।

অনুনাদী বাক্সে বসানো এক সুরশলাকার কথা ধরা যাক। তার বাহুতে আঘাত ক'রে তাকে কাঁপালে স্পন্দন বাক্সের ভেতরের বায়ুতে (পরবশ) কম্পন জাগায়। সুরশলাকা আর বায়ুর যুগ্ম স্পন্দন শব্দকে জোরালো করে। কিন্তু এক্ষেত্রে সুরশলাকা চালক—অনুনাদ বজায় রাখতে সে বায়ুতে চূড়ান্ত হারে শক্তি যুগিয়ে যাচ্ছে, সুতরাং তার স্বকীয় কম্পনশক্তি শীঘ্রই ফুরিয়ে যাবে ; কাজেই চালকের স্পন্দনবিস্তার বা কম্পাংক কোনটাই অক্ষুণ্ণ থাকতে পারে না। স্পন্দকসংস্থা-দুটির শক্তিভাণ্ডার তুলনীয় হলে চালক ও চালিতের ভূমিকায় পালাবদল সম্ভব। নিউটনের তৃতীয় গতিসূত্রানুযায়ী দুই সদস্যের মধ্যে পারস্পরিক প্রতিক্রিয়া সব সময়েই ঘটে, তবে তারা তুল্যমূল্য হলেই বিনিময় স্পষ্ট হয়ে ওঠে।

পরীক্ষা : খুব সহজ একটি পরীক্ষায় যুগ্ম স্পন্দনের বৈশিষ্ট্যগুলি পরিস্ফুট হয়। দুই প্রান্তে আটকানো একটা মোটা দড়ি থেকে OA এবং $O'B$ দুটি সমদৈর্ঘ্য দোলক (4.1 চিত্র) ঝোলানো আছে। A-কে দড়ির সমকোণে

দুলিয়ে দিলে দেখা যাবে যে Bও দুলতে সুরু করেছে—অর্থাৎ শক্তি দড়ির মধ্যে দিয়ে সঞ্চারিত হয়েছে। শক্তি হস্তান্তর হতে থাকায় A-র দোলনবিস্তার ক্রমেই কমতে থাকবে আর B-র বাড়তে থাকবে। শেষ পর্যন্ত A ক্ষণেকের জন্যে থেমে যাবে। এবারে B হয়ে দাঁড়াবে চালক আর A চালিত দোলক অর্থাৎ

চিত্র 4.1—যুগ্ম স্পন্দনের যান্ত্রিক উদাহরণ

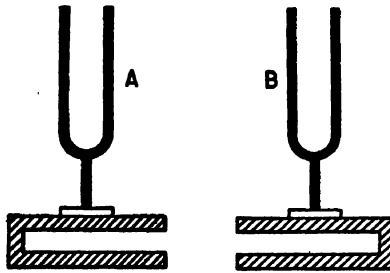
নিউটনের তৃতীয় সূত্রানুসারে প্রতিক্রিয়া বল সক্রিয় হবে। এবারে দড়ির মাধ্যমে উল্টোমুখে শক্তিসঞ্চালন হতে থাকবে, ফলে A-র দোলন বাড়তে এবং

চিত্র 4.2—যুগ্ম স্পন্দনে কাল-সরণ রেখা

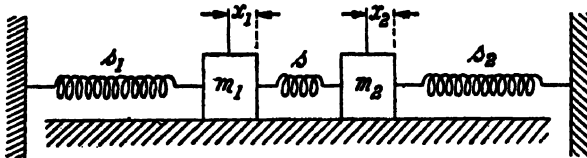
B-র দোলন কমতে থাকবে এবং শেষ পর্যন্ত Bও ক্ষণিকের জন্যে থেমে যাবে। এইভাবেই শক্তির আদানপ্রদান চলতে থাকবে। তবে ঘর্ষণের ফলে প্রতি চক্রেই অল্প অল্প ক'রে শক্তির অপচয় হতে হতে দুই দোলকই থেমে যাবে। 4.2 চিত্রে দোলক-দুটির দোলনবিস্তারের ক্রমহ্রাসবৃদ্ধি দেখানো হয়েছে।

দোলনশক্তির হস্তান্তরের সময়-হার যোজনমাত্রার (degree of coupling) ওপর নির্ভরশীল। সংযোগকারী দড়িটিতে টান জোরালো থাকলে O এবং O' বিন্দুর বিচলন হয় সামান্য, ফলে শক্তির হস্তান্তরও অল্প হয়; তখন যোজন শিথিল (loose) বলা হয়। পক্ষান্তরে দড়ি আলগা থাকলে দ্রুতহারে পর্যাপ্ত শক্তির হস্তান্তর হয় এবং তখন যোজন গাঢ় (tight) বলা হয়। দড়ির ভর m এবং দোলক-দুটির ভর M_1 এবং M_2 হলে যোজনাংক (coefficient of coupling) দাঁড়াবে

$$k=\frac{M_1M_2}{\sqrt{(m+M_1)(m+M_2)}}$$

স্পষ্টতই দড়ির ভর বাড়লে দুই দোলকের মধ্যে যোজন শিথিল হয়ে যায়।

দুটি একেবারে অভিন্ন অনুনাদী বাক্সে বসানো সমকম্পাংক সুরশলাকা

চিত্র 4.3—সুরশলাকার যুগ্ম স্পন্দন

(4.3 চিত্র) নিয়ে তাদের খোলা দুই মুখ একেবারে সামনাসামনি এবং খুব কাছে রেখে একটি সুরশলাকা জোরে উদ্দীপিত করলে অন্যটিকে বাজতে দেখা যায়।

চিত্র 4.4—দার্ঢ্য-যোজিত যুগ্ম স্পন্দন

আগের মতো এক্ষেত্রেও দুটি সুরশলাকার মধ্যে শক্তির আদানপ্রদান হবে এবং পর্যায়ক্রমে একটির শব্দ জোরালো, অপরটির মৃদু হবে। বায়ু খুব শিথিল যোজক ব'লে এই পরীক্ষণে সাফল্যলাভ করা শক্ত। এদের বা যেকোন সুরশলাকা

আর তার অনুনাদী বাক্সের বায়ুর শব্দকে শাব্দযোজনের (acoustic coupling) উদাহরণ ব'লে ধরা যায়। যেকোন তারবাদ্যেও তার এবং শব্দাসনের মধ্যে শাব্দযোজন ঘটে থাকে। বৈদ্যুতিক যুগ্ম স্পন্দনের ব্যবহারিক প্রয়োগের ক্ষেত্র বিস্তৃত এবং দুই বর্তনীর কোন সংযোগী অংশের বা তাদের মধ্যে পারস্পরিক আবেশের মাধ্যমে স্পন্দন-যোজন করা যায়। 4.4 চিত্রে একটি সরল যান্ত্রিক যুগ্ম স্পন্দক দেখানো হয়েছে—বিশ্লেষণ ৪-৫ অনুচ্ছেদে।

৪-২. যুগ্ম স্পন্দনে কম্পনের স্বভাবী রীতি (Normal modes in coupled vibration)

একাধিক স্পন্দক যুক্ত থাকলে তাদের যেকোনটিকে এককভাবে স্পন্দিত করা যায় না। কেননা যোজকের মাধ্যমে তার স্পন্দন অন্যদের মধ্যে সঞ্চালিত হয়। তখন তাদের যুক্তভাবে নানা দশায় স্পন্দন হয় এবং গোটা সংস্থার যৌথ আন্দোলন বিচার করা দরকার হয়ে পড়ে। এদের কোন-একটির স্পন্দন যদি সরল দোলনও হয় তবু পারস্পরিক প্রতিক্রিয়ায় স্পন্দনের সে বৈশিষ্ট্য থাকতে পারে না। তখন প্রত্যেকের আন্দোলনই একাধিক কম্পাংকে হয়। এই কম্পাংক স্পন্দকের স্ববশ স্পন্দনাংক থেকে সাধারণত আলাদাই হয়। যুগ্ম স্পন্দন পর্যাবৃত্ত প্রকৃতির নাও হতে পারে এবং অনেকক্ষেত্রেই হয় না।

এই ধরনের যৌথ আন্দোলনে স্পন্দনের স্বভাবী রীতির আলোচনার প্রয়োজন মৌলিক। এই রীতির পরিপ্রেক্ষিতে বিবেচনা করলে যেকোন স্পন্দকের একক স্পন্দন জটিল, এমনকি অ-পর্যাবৃত্ত গতি হলেও অনেক সহজে বোঝা যায়। দেখা গেছে যে, যদি সঠিকভাবে উদ্দীপিত করা যায়, তাহলে যৌথ সংস্থার স্পন্দন সামগ্রিকভাবে সরল দোলনই হয়। সেই ধরনের স্পন্দনকে যুগ্ম-সংস্থার কম্পনের **স্বভাবী রীতি** বলে। স্বভাবী রীতিতে স্পন্দনের কম্পাংক সংস্থার স্বভাবী কম্পাংক। সংস্থার যতগুলি স্বাধীন স্পন্দন হতে পারে তার স্বভাবী কম্পাংকও ততগুলি। সাধারণভাবে যেকোন আঙ্গিক (component) স্পন্দকের স্বভাবী কম্পাংকগুলি তার স্ববশ কম্পাংক থেকে ভিন্ন হয়; যোজনের জন্যই এরকম ঘটে। সংস্থাটির যেকোন স্বৈচ্ছিক গতিকেই একাধিক স্বভাবী স্পন্দনরীতির উপরিপাতন ব'লে ধরা যায়। সংস্থাভুক্ত যেকোন একটি স্পন্দকের স্বৈচ্ছিক গতির বেলাতেও তাই।

স্বভাবী রীতিতে কোন স্পন্দন ঘটলে তাকে কোন এক কল্পিত বিন্দুতে অবস্থিত কণার স্পন্দন এবং সেই কল্পিত অবস্থানের স্থানাংককে স্বভাবী স্থানাংক ব'লে ধরা যায়। এই স্থানাংক, সংস্থার প্রতিটি আঙ্গিক স্পন্দকের

স্থানাংকের ওপর নির্ভরশীল—রৈখিক ফলন। খুব সরল ক্ষেত্রে সংস্থার স্থানাংকের পরিপ্রেক্ষিতে সংস্থার স্বভাবী স্থানাংক বার করা সম্ভব। কিন্তু স্বভাবী কম্পাংক নির্ণয়ে তাদের দরকার নেই।

৪-৩. যুগ্ম স্পন্দনের প্রকারভেদ :

আমরা ধরে নিচ্ছি যে (i) স্পন্দকসংস্থার দুটি মাত্র স্বতন্ত্র স্পন্দনরীতি আছে এবং (ii) স্পন্দনে বাধাবল অনুপস্থিত। যুগ্ম স্পন্দনে মূল কথা—দুই যোজিত স্পন্দকের মধ্যে পরস্পরের মধ্যে শক্তিবিনিময়ের (অর্থাৎ উভয়মুখী ক্রিয়াপ্রতিক্রিয়া বল প্রয়োগের) ব্যবস্থা থাকবে। আদর্শক্ষেত্রে, পরস্পরের মধ্যে প্রতিক্রিয়া বল আপেক্ষিক সরণ, বেগ বা ত্বরণের সমানুপাতিক হতে পারে। এই যোজনরীতিগুলিকে যথাক্রমে (১) দার্ঢ্য-যোজিত, (২) রোধ-যোজিত এবং (৩) জাড্য-যোজিত বলা যেতে পারে। (এই প্রসঙ্গে পূর্ববর্তী ৩-১১ অনুচ্ছেদ—স্পন্দনরীতিনিয়ন্ত্রণ ব্যবস্থা দ্রষ্টব্য)। বাস্তবক্ষেত্রে একাধিক রীতিই কার্যকরী হতে পারে। কোন স্পন্দকের মধ্যক অবস্থান থেকে সরণ এবং তদ্ভূত ত্বরণ পরস্পর সমানুপাতিক ; তাই প্রথম এবং তৃতীয় ক্ষেত্রে গাণিতীয় বিশ্লেষণ অভিন্ন। আমরা কেবল এই দুটিই আলোচনা করবো।

4.1 চিত্রে OO' দড়ি A এবং B দোলক-দুটির মধ্যে **জাড্য-যোজন** রচনা করেছে। 4.4 চিত্রে m_1 এবং m_2 দুই ভরের মধ্যে স্প্রিং s_3 **দার্ঢ্য-যোজন** রচনা করেছে। ভর-দুটি আরও দুটি স্প্রিং-এর সাহায্যে দৃঢ়ভাবে দেওয়ালে আটকানো এবং তারা একটি খাদের (groove) মধ্যে দিয়ে বিনা ঘর্ষণে এগোতে পেছোতে পারে। দোলক বা ভরদ্বয় যদি সান্দ্রমাধ্যমে আন্দোলিত হ'ত তবে তাদের আন্দোলন **রোধ-যোজিত** হ'ত। তখন সান্দ্রতার দরুন অবদমন থাকায় গাণিতীয় বিশ্লেষণ আরও জটিল হ'ত—তাই সে আলোচনা করছি না।

৪-৪. জাড্য-যোজনে স্পন্দন (Vibrations of Inertia-coupled system) :

ধরা যাক যে যুগ্ম দোলকে (4.1 চিত্র) A-র ভর m_1 এবং কোন এক নিমেষে সরণ x_1 আর তার দোলন **বাধারহিত**। সুতরাং তার গতির সমীকরণ $m_1\ddot{x}_1 + s_1x_1 = 0$ আর অনুরূপে B দোলকের গতির সমীকরণ $m_2\ddot{x}_2 + s_2x_2 = 0$ হবে। যোজক-দড়ির মারফৎ তারা পরস্পরের ওপর

সমান ও বিপরীত বল প্রয়োগ করবে। ভর × ত্বরণ ($=M\ddot{x}$) আকারে এই বল প্রতিটি সমীকরণের অন্তর্ভুক্ত হবে। গতীয় সমীকরণ তাহলে দাঁড়াচ্ছে

$$m_1\ddot{x}_1 + M\ddot{x}_2 + s_1x_1 = 0$$

আর $$m_2\ddot{x}_2 + M\ddot{x}_1 + s_2x_2 = 0 \qquad (৪\text{-}৪.১)$$

মাঝের রাশিটি পারস্পরিক বল নির্দেশ করে এবং M রাশিটি দুই দোলকের ভরের মধ্যেই যৌথভাবে রয়েছে।

ক. **স্পন্দনাংক :** আমরা ধ'রে নেব যে, যুগ্ম গতি সরল দোলনের রূপেই হবে। তখন পরখ সমাধান হিসাবে লেখা যাবে

$$x_1 = Ae^{j\omega t} \quad \text{অর্থাৎ} \quad \ddot{x}_1 = -\omega^2 Ae^{j\omega t}$$

৪-৪.১-এর দ্বিতীয় সমীকরণে এই মান বসিয়ে মেলে

$$m_2\ddot{x}_2 + s_2x_2 = \omega^2 MAe^{j\omega t}$$

এই ফল এক পরবশ কম্পনের অবকল সমীকরণ। অনুরূপভাবে

$$x_2 = Be^{j\omega t} \text{ এবং } \ddot{x}_2 = -\omega^2 Be^{j\omega t}$$

আমরা জানি এখানে দুই দোলকের স্পন্দনাংক শেষ পর্যন্ত একই হয়ে দাঁড়াবে। কিন্তু সব ক্ষেত্রে দুই স্পন্দকের কম্পাংক এক হয় না, কারণ A এবং B নিজেরাই জটিল রাশি। এখন গতির সমীকরণে x_1, x_2, $\ddot{x}_1$ ও $\ddot{x}_2$-এর মান বসালে পাওয়া যাবে

$$(-m_1\omega^2 A - M\omega^2 B + s_1 A)\, e^{j\omega t} = 0$$

এবং $$(-m_2\omega^2 B - M\omega^2 A + s_2 B)\, e^{j\omega t} = 0 \qquad (৪\text{-}৪.২)$$

যেহেতু t-র সকল মানে $e^{j\omega t} \neq 0$, আমরা লিখতে পারি

$$A\,(s_1 - m_1\omega^2) = BM\omega^2$$

এবং $$B\,(s_2 - m_2\omega^2) = AM\omega^2$$

তাহলে $$\frac{s_1 - m_1\omega}{M\omega^2} = \frac{B}{A} = \frac{M\omega^2}{s_2 - m_2\omega} \qquad (৪\text{-}৪.৩)$$

এবারে বজ্রগুণন ক'রে পাচ্ছি

$$M^2\omega^4 = (s_1 - m_1\omega^2)(s_2 - m_2\omega^2)$$
$$= s_1s_2 + m_1m_2\omega^4 - s_1m_2\omega^2 - s_2m_1\omega^2$$

সবাইকে $m_1 m_2$ দিয়ে ভাগ করলে দাঁড়াবে

$$\omega^4\left(\frac{M^2}{m_1 m_2}-1\right)=\frac{s_1 s_2}{m_1 m_2}-\frac{s_1}{m_1}\,\omega^2-\frac{s_2}{m_2}\,\omega^2$$
$$=(\omega_0\omega_0')^2-\omega_0^2\omega^2-\omega_0'^2\omega^2$$

এখানে ω_0 এবং ω_0' দুই দোলকের অদমিত স্পন্দনাংক। এখন $M^2/m_1 m_2 = k^2$ (যোজন-গুণাংক) ধরলে সমীকরণ দাঁড়াবে

$$(1-k^2)\,\omega^4-\omega^2\,(\omega_0^2+\omega_0'^2)+\omega_0^2.\omega_0'^2=0 \qquad (৪\text{-}৪.৪)$$

$$\therefore\ \ \omega^2=\frac{(\omega_0^2+\omega_0'^2)\pm\sqrt{(\omega_0^2+\omega_0'^2)^2-4\omega_0^2.\omega_0'^2\,(1-k^2)}}{2\,(1-k^2)}$$

(৪-৪.৫)

কাজেই সংস্থার দুই আঙ্গিকের প্রত্যেকটিরই দুটি ক'রে কম্পাংক বা স্বভাবী কম্পনরীতি সম্ভব। আমাদের উদাহরণে $\omega_0=\omega_0'$; সুতরাং

$$\omega^2=\frac{2\omega_0^2\pm\sqrt{4\omega_0^4k^2}}{2(1-k^2)}=\omega_0^2\left(\frac{1\pm k}{1-k^2}\right)$$

$$\therefore\quad \omega_+=\frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}}\quad \omega_-=\frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} \qquad (৪\text{-}৪.৬)$$

অতএব স্পন্দকদের দুই স্বভাবী স্পন্দনাংক তাদের অদমিত কম্পাংকের চেয়ে বেশী এবং কম। তাদের মধ্যে তফাৎ যোজনমাত্রার সঙ্গে বাড়তে থাকে।

খ. গতির সাধারণ সমাধান ঃ ৪-৪.৩ সমীকরণ থেকে পাই

$$B=\frac{A}{M\omega^2}\,(s_1-m_1\omega^2)=\frac{m_1A}{M\omega^2}\,(s_1/m_1-\omega^2)$$

$$=\frac{m_1A}{M\omega^2}\,(\omega_0^2-\omega^2)=\frac{m_1A}{M}\,(\omega_0^2/\omega^2-1)$$

$$=\frac{m_1A}{M}\left(\omega_0^2\frac{1+k}{\omega_0^2}-1\right)$$ [৪-৪.৬ থেকে ω_+ এর মান]

$$=\frac{m_1A}{M}\ k=\frac{m_1}{M}\,A\,\frac{M}{\sqrt{m_1m_2}}=A\sqrt{m_1/m_2}$$

আবার ৪-৪.৬ সমীকরণ থেকে $\omega_- = \omega_0/\sqrt{1-k}$ বসিয়ে B-র আর এক মান হবে $-A\sqrt{m_1/m_2}$; এখন ৪-৪.১ সমীকরণের সমাধান হিসাবে লেখা যায়

$$x_1 = Ae^{j\omega t} = A_1 \cos(\omega_+ t + \alpha) + A_2 \cos(\omega t + \alpha')$$

(৪-৪.৭)

এবং $x_2 = Be^{j\omega t} = \sqrt{m_1/m_2}.[A_1 \cos(\dot{\omega}_+ t + \beta)$
$-A_2 \cos(\omega_- t + \beta')]$

আগের আগের মতো এক্ষেত্রেও A এবং B-র মান নির্ণয় করতে আদি সরণ বা আদি বেগ প্রয়োগ করে স্পন্দন সুরু করা দরকার। সুরুতে $(t=0)$ সরণ x_0 থাকলে প্রান্তিক সর্তগুলি হবে

$$x = x_0,\ \dot{x}_1 = 0,\ x_2 = 0\ \dot{x}_2 = 0$$

তাহলে ৪-৪.৭ সমীকরণে এইসব মান বসালে পাওয়া যাবে

$$x_0 = A_1 \cos\alpha + A_2 \cos\alpha'$$

$$0 = -\omega_+ A_1 \sin\alpha - \omega_- A_2 \sin\alpha'$$

$$0 = \sqrt{m_1/m_2}(A_1 \cos\beta - A_2 \cos\beta')$$

$$= A_1 \cos\beta - A_2 \cos\beta'. \qquad [\because\ m_1/m_2 \neq 0]$$

$$0 = -\omega_+ A_1 \sin\beta_1 + \omega_- A_2 \sin\beta'$$

এই সর্তগুলি পূরণ হতে হলে আদিদশার প্রতিটিই শূন্য হওয়া চাই। তখন দাঁড়াবে

$$A_1 = A_2 = x_0/2$$

কাজেই $$x_1 = \frac{x_0}{2}\left(\cos\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1+k}} + \cos\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1-k}}\right) \qquad (৪\text{-}৪.৮)$$

এবং $$x_2 = \frac{x_0}{2}\sqrt{\frac{m_1}{m_2}}\left(\cos\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1+k}} - \cos\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1-k}}\right)$$

(৪-৪.৯)

যোজন খুব শিথিল হলে $k \to 0$ এবং তখন

$$x_1 = x_0 \cos\omega_0 t \cos\tfrac{1}{2}\omega_0 kt \qquad (৪\text{-}৪.১০)$$

আর $$x_2 = (\sqrt{m_1/m_2})\, x_0 \sin\omega_0 kt\ \sin\tfrac{1}{2}\omega_0 kt$$

4.2 চিত্র এই দুই সমীকরণের সরণ-সময় লেখচিত্র।

আবার সুরুতে ($t=0$) ধাক্কা দিয়ে u_0 বেগসহ গতি সুরু করলে প্রান্তিক সর্ত হবে

$$x_1=x_2=0,\ \dot{x}_1=u_0 \text{ আর } \dot{x}_2=0$$

$$\text{তাহলে}\quad 0=A_1\cos\alpha+A_2\cos\alpha'$$

$$0=A_1\cos\beta-A_2\cos\beta'$$

$$u_0=-(\omega_+A_1\sin\alpha+\omega_-A_2\sin\alpha')$$

$$0=-(\omega_+A_1\sin\beta+\omega_-A_2\sin\beta_2)$$

$$[\because\quad m_1/m_2\neq 0]$$

এই সর্তগুলি পূরণ করতে হলে সব আদিদশাগুলি $\pi/2$ হতে হবে তখন $\omega_+A_1=\omega_-A_2$ হবে, তাহলে

$$u_0=-2\omega_+A_1 \text{ বা } -2\omega_-A_2 \text{ এবং}$$

$$A_1=-(u_0/2\omega_+)=-\frac{u_0\sqrt{1+k}}{2\omega_c} \tag{৪-৪.১১}$$

$$\text{এবং}\quad A_2=-(u_0/2\omega_-)=-\frac{u_0\sqrt{1-k}}{2\omega_0}$$

$$\text{তাহলে}\quad x_1=-\frac{u_0}{2\omega_0}\left[\sqrt{1+k}\cos\left(\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1+k}}+\frac{\pi}{2}\right)+\sqrt{1-k}\cos\left(\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1-k}}+\frac{\pi}{2}\right)\right]$$

$$=\frac{u_0}{2\omega_0}\left[\sqrt{1+k}\sin\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1+k}}+\sqrt{1-k}\sin\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1-k}}\right] \tag{৪-৪.১২}$$

$$\text{এবং}\quad x_2=\frac{u_0}{2\omega_0}\left(\frac{m_1}{m_2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\sqrt{1+k}\sin\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1+k}}-\sqrt{1-k}\sin\frac{\omega_0 t}{\sqrt{1-k}}\right)$$

আগের মতোই যোজন শিথিল হলে $k \to 0$ হবে এবং

$$\frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} = \omega_0(1-\tfrac{1}{2}k)$$

এবং $$\frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} = \omega_0(1+\tfrac{1}{2}k)$$

তখন $$x_1 = \frac{u_0}{\omega_0} \cdot \cos \tfrac{1}{2}\, \omega_0 kt.\ \sin \omega_0 t$$

(৪-৪.১৩)

এবং $$x_2 = -\frac{u_0}{\omega_0}\left(\frac{m_1}{m_2}\right)^{\frac{1}{2}} \sin \tfrac{1}{2}\, \omega_0 kt \cos \omega_0 t$$

শিথিল যোজনে আদি সরণ বা আদি বেগসহ জাড্য-যোজিত যুগ্ম স্পন্দন সুরু হলে সরণের মান (৪-৪.১০) বা (৪-৪.১৩) সমীকরণ দিয়ে নির্ধারিত হয়।

৪-৫. দার্ঢ্য-যোজনে যুগ্ম স্পন্দন

4.4 চিত্রে প্রদর্শিত আদর্শ দার্ঢ্য-যোজিত সংস্থার স্পন্দনের t মুহূর্তে m_1 এবং m_2 ভরের সাম্য-অবস্থান থেকে সরণ x_1 এবং x_2 হলে, ঘর্ষণের অনুপস্থিতিতে

$$m_1\ddot{x}_1 + s_1 x_1 = 0 \text{ এবং } m_2\ddot{x}_2 + s_2 x_2 = 0$$

তাদের যুগ্মগতিতে পারস্পারিক প্রতিক্রিয়া বল তাদের সরণের প্রভেদের সমানুপাতিক ; তারা সমান এবং বিপরীতমুখী ব'লে m_1 এবং m_2-এর ওপর সক্রিয় বাড়তি বল যথাক্রমে $-s_3(x_1-x_2)$ আর $-s_3(x_2-x_1)$ হবে। কাজেই স্পন্দনের সমীকরণ হবে

$$m_1\ddot{x}_1 + s_1 x_1 = -s_3(x_1 - x_2)$$

এবং $$m_2\ddot{x}_2 + s_2 x_2 = -s_3(x_2 - x_1) \qquad (৪\text{-}৫.১)$$

অর্থাৎ $$m_1\ddot{x}_1 + (s_1 + s_3)x_1 = s_3 x_2$$

এবং $$m_2\ddot{x}_2 + (s_2 + s_3)x_2 = s_3 x_1$$

সমীকরণ দুটিতে প্রতিসম রূপ দিতে আমরা দুটি নতুন চলক

$z_1 = x_1\sqrt{m_1}$ এবং $z_2 = x_2\sqrt{m_2}$ আনবো। তাহলে ৪-৫.১ সমীকরণের চেহারা হবে

$$m_1 \frac{\ddot{z}_1}{\sqrt{m_1}} + (s_1 + s_3)\frac{z_1}{\sqrt{m_1}} = s_3 \frac{z_2}{\sqrt{m_2}}$$

বা $$\ddot{z}_1 + (s_1 + s_3)\frac{z_1}{m_1} = s_3 \frac{z_2}{\sqrt{m_1 m_2}}$$

অনুরূপেই, $$\ddot{z}_2 + (s_2 + s_3)\frac{z_2}{m_2} = s_3 \frac{z_1}{\sqrt{m_1 m_2}}$$

এখন $(s_1 + s_3)/m = \omega_1^2$ এবং $(s_2 + s_3)/m_2 = \omega_2^2$ বসালে সমীকরণ-দুটি দাঁড়াবে

$$\ddot{z}_1 + \omega^2{}_1 z_1 = sz_2$$

এবং $$\ddot{z}_2 + \omega_2^2 z_2 = sz_1 \qquad (s = s_3/\sqrt{m_1 m_2}) \qquad (৪\text{-}৫.২)$$

ক. **স্পন্দনাংক :** এই সমীকরণ-দুটি রৈখিক, দ্বিঘাত, স্থিরগুণাংক, অবকল সহসমীকরণ। তাদের পর্যাবৃত্ত সমাধান $z_1 = Ae^{j\omega t}$ এবং $z_2 = Be^{j\omega t}$ কি কি সর্তাধীনে আসে তা আমরা আলোচনা করবো (পর্যাবৃত্ত সমাধান সব সময়ে হবে না)। সেক্ষেত্রে আমরা আগের মতোই ধ'রে নেব যে স্পন্দক-দুটির কম্পাংক (ω) অভিন্ন। তাহলে

$$\ddot{z}_1 = -\omega^2 Ae^{j\omega t} \text{ এবং } \ddot{z}_2 = -\omega^2 Be^{j\omega t}$$

৪-৫.২ সমীকরণে z_1, z_2, $\ddot{z}_1$ এবং $\ddot{z}_2$ এর মান বসালে আমরা পাচ্ছি

$$(\omega_1^2 - \omega^2)A = sB \qquad (৪\text{-}৫.৩)$$

এবং $$(\omega_2^2 - \omega^2)B = sA$$

এদের গুণ ক'রে পাই $s^2 = (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)$

বা $$\omega^4 - \omega^2(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \omega_1^2\omega_2^2 - s^2 = 0 \qquad (৪\text{-}৫.৪)$$

এই সমীকরণকে স্থায়ী (secular) সমীকরণ বলে। এর সমাধান করলে আসে

$$\omega^2 = \tfrac{1}{2}(\omega_1^2 + \omega_2^2) \pm \tfrac{1}{2}[(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 - 4(\omega_1^2\omega_2^2 - s^2)]^{1/2}$$

$$= \tfrac{1}{2}[\omega_1^2 + \omega_2^2) \pm \{(\omega_1^2 - \omega_2^2) + 4s^2\}^{1/2}]$$

$$\therefore\ \omega_+ = [\tfrac{1}{2}(\omega_1^2 + \omega_2^2) + \tfrac{1}{2}\{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + 4s^2\}^{1/2}]$$

$$\omega_- = [\tfrac{1}{2}(\omega_1^2 + \omega_2^2) - \tfrac{1}{2}\{(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 + 4s^2\}^{1/2}] \qquad (৪\text{-}৫.৫)$$

ω_+ এবং ω_- যুগ্ম-সংস্থার দুই স্বভাবী স্পন্দনাংক এবং তারা ω_1 এবং ω_2-র তুলনায় যথাক্রমে বেশী এবং কম। যোজনমাত্রা বাড়লে এদের মধ্যে পার্থক্যও বাড়ে।

৪-৫.৫-এ কম্পাংক নির্দিষ্ট হতে হলে ৪-৫.৩ সমীকরণে A এবং B-র মান পূরণ হতে হবে। তাহলে ω_+এর মান হবে

$$A_+(\omega_1^2-\omega_+^2)=sB_+ \text{ এবং } B_+(\omega_2^2-\omega_+^2)=sA_+$$

$$\frac{A_+}{B_+}=\frac{s}{\omega_1^2-\omega_+^2}=\frac{\omega_2^2-\omega_+^2}{s} \qquad (৪\text{-}৫.৬ক)$$

A এবং B-র অনুপাত এই হলে তবেই ω_+ কম্পাংকে সংস্থার স্পন্দন হবে। গতিকালে এই অনুপাত বদলাবে না। যেহেতু $\omega_+ > \omega_1$ এবং ω_2, এই অনুপাত ঋণাত্মক এবং কাজেই দুই স্পন্দকের গতি বিপরীতমুখী। অনুরূপেই কম্পাংক ω_- হতে হলে

$$\frac{A_-}{B_-}=\frac{s}{\omega_1^2-\omega_-^2}=\frac{\omega_2^2-\omega_-^2}{s} \qquad (৪\text{-}৫.৬খ)$$

এখানে অনুপাতের মান ধনাত্মক এবং স্পন্দকদের গতি সমমুখী।

অন্য রীতিতে স্পন্দন সুরু করলে (ω_+/ω_-) অনুপাত অখণ্ড সংখ্যা হবে না। না হলে, স্পন্দন-বিস্তার কেবলই বদলাতে থাকবে এবং গতি পর্যাবৃত্ত থাকবে না। সংস্থার প্রকৃত গতি পেতে হলে দুই স্বভাবী স্পন্দনরীতির উপরিপাতন ঘটাতে হয়। তখন

$$z_1=x_1\sqrt{m_1}=C_+\cos\alpha.e^{j\omega_+t}+C_-\sin\alpha.\ e^{j\omega_-t}$$

এবং $$z_2=x_2\sqrt{m_2}=-C_+\sin\alpha.\ e^{j\omega_+t}+C_-\cos\alpha.e^{j\omega_-t}$$

$$(৪\text{-}৫.৭)$$

এবং
$$\left.\begin{aligned} A_+&=C_+\cos\alpha, \qquad A_-=C_-\sin\alpha\\ B_+&=-C_+\sin\alpha, \quad B_-=C_-\cos\alpha\\ \tan\alpha&=\frac{\omega_+^2-\omega^2}{s}=\frac{s}{\omega_+^2-\omega_2^2}=\frac{\omega_1^2-\omega_-^2}{s}=\frac{s}{\omega_1^2-\omega_-^2}\end{aligned}\right\}$$

$$(৪\text{-}৫.৮)$$

স্বভাবী স্থানাংক : ৪-২ অনুচ্ছেদের শেষে আমরা স্বভাবী স্থানাংকের কথা বলেছি। আলোচিত ক্ষেত্রে তার একটা উদাহরণ পাওয়া যায়। ৪-৫.৭ সমীকরণে যদি

$X_1 = z_1 \sin\alpha + z_2 \cos\alpha$ এবং $X_2 = z_1 \cos\alpha - z_2 \sin\alpha$ বসানো যায় তাহলে মেলে $X_1 = C_- e^{j\omega_- t}$ এবং $X_2 = C_+ e^{j\omega_+ t}$ (৪-৫.৯) এই X_1 এবং X_2 হচ্ছে $z_1\ (= x_1 \sqrt{m_1})$ এবং $z_2\ (= x_2 \sqrt{m})$ তথা স্পন্দক-দুটির স্থানাংক x_1 এবং x_2-এর রৈখিক সমবায়। এরাই সংস্থার দুই স্বভাবী স্থানাংক বা নির্দেশাংক।

খ. গতির সমাধান : এপর্যন্ত স্পন্দকদের ভর এবং কম্পাংক আলাদা আলাদা ধরা হয়েছে। সেক্ষেত্রে x_1 বা x_2-র মান নির্ণয় করা বেশ কঠিন। সেটা সরল করতে আমরা প্রথমে দুই স্পন্দনাংক সমান এবং পরে তৎসহ দুই ভরও সমান ধরবো। এই সমাধান করতে স্বভাবী স্থানাংক কাজে লাগানো হবে।

(১) $\omega_1 = \omega_2$; $m \neq m_2$; যোজন দুর্বল হলে s_1 এবং $s_2 \gg s_3$ হয় এবং $\omega_1^2 = (s_1 + s_3)/m_1 \simeq s_1/m_1$ এবং অনুরূপে $\omega_2^2 = s_2/m$ হয়ে দাঁড়ায়। কাজেই ω_1 এবং ω_2, স্পন্দকদের নিজস্ব অদমিত কম্পাংকের (ω_0) সমান অর্থাৎ $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ হয়। তাহলে ৪-৫.২ সমীকরণ হচ্ছে

$$\ddot{z}_1 + \omega_0^2 z_1 = s z_2$$
$$\ddot{z}_2 + \omega_0^2 z_2 = s z_1$$

এদের যোগ এবং বিয়োগ ক'রে মেলে যথাক্রমে

$$(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2) + (\omega_0^2 - s)(z_1 + z_2) = 0$$

অর্থাৎ, $$\ddot{X}_1 + \omega_-^2 X_1 = 0 \qquad (৪\text{-}৫.১০)$$

এবং $(\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2) + (\omega_0^2 + s)(z_1 - z_2) = 0$ অর্থাৎ $\ddot{X}_2 + \omega_+^2 X_2 = 0$

সুতরাং $X_1(= x_1 \sqrt{m_1} + x_2 \sqrt{m_2})$ এবং $X_2(= x_1 \sqrt{m_1} - x_2 \sqrt{m_2})$ দুই স্বভাবী স্থানাংকের যথাক্রমে $\omega_-(= \sqrt{\omega_0^2 - s})$ এবং $\omega_+(= \sqrt{\omega_0^2 + s})$ এই দুই কম্পাংকে সরল দোলন হবে। কাজেই $(z_1 + z_2)$ এবং $(z_1 - z_2)$, স্পন্দনের স্বভাবী স্থানাংক এবং $\omega_-(< \omega_0)$ এবং $\omega_+(> \omega_0)$ তাদের যথাক্রমে স্বভাবী কম্পাংক। এখন ৪-৫.১০ সমীকরণ-দুটির সমাধান হিসাবে লেখা যায়

$$X_1 = x_1 \sqrt{m_1} + x_2 \sqrt{m} = C_- e^{j\omega_- t}$$
$$X_2 = x_1 \sqrt{m_1} - x_2 \sqrt{m} = C_+ e^{j\omega_+ t}$$

তাহলে $X_1 + X_2 = 2x_1 \sqrt{m} = (C_- e^{j\omega_- t} + C_+ e^{j\omega_+ t})$

এবং $X_1 - X_2 = 2x_2 \sqrt{m} = (C_- e^{j\omega_- t} - C_+ e^{j\omega_+ t})$

সুতরাং $$x_1 = \frac{1}{2\sqrt{m_1}}(C_- e^{j\omega_- t} + C_+ e^{j\omega_+ t})$$

এবং $$x_2 = \frac{1}{2\sqrt{m_2}}(C_- e^{j\omega_- t} - C_+ e^{j\omega_\pm t}) \qquad (৪\text{-}৫.১১)$$

অর্থাৎ দুই স্বভাবী স্পন্দনাংকে যদি স্পন্দন ঘটে এবং তাদের উপরিপাতন হয় তাহলে স্পন্দকদ্বয়ের যেকোনটির গতি পাওয়া যায়। C এবং ω-গুলির যথাযথ মানগুলি বসালে ৪-৪.১৩ সমীকরণ-দুটির মতো পাই

$$x_1 = x_0 \cos\frac{st}{2\omega_0}\cos\omega_0 t$$

এবং $$x_2 = x_0\sqrt{m/m_2}\,\sin\frac{st}{2\omega_0}\cdot\sin\omega_0 t \qquad (৪\text{-}৫.১২)$$

(২) $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$; $\mathbf{m_1 = m_2 = m}$. এক্ষেত্রে গতির সমীকরণ সরাসরি হবে

$$\ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = s x_2 \text{ এবং } \ddot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 = s x_2$$

এখানে যোজন দুর্বল ব'লে $s = s_3/m$

এবং $\omega_0^2 = (s_1 + s_3)/m = (s_2 + s_3)/m$

এক্ষেত্রে স্বভাবী স্থানাংক $X_1 = x_1 + x_2$ আর $X_2 = x_1 - x_2$ এবং স্বভাবী স্পন্দনাংক যথাক্রমে

$$\omega_+ = \sqrt{\omega_0^2 + s} = \omega_0 + s/2\omega_0 \text{ এবং } \omega_- = \omega_0 - s/2\omega_0$$

এখন $X_1 = C_- e^{j\omega_- t}$ এবং $X_2 = C_+ e^{j\omega_+ t}$

অতএব $$x_1 = \tfrac{1}{2}(C_- e^{j\omega_- t} + C_+ e^{j\omega_+ t})$$

এবং $$x_2 = \tfrac{1}{2}C_- e^{j\omega_- t} - C_+ e^{j\omega_+ t})$$

এদের বাস্তব অংশগুলিকে সমাধান হিসাবে নিলে লেখা যাবে

$$x_1 = \tfrac{1}{2}(C_- \cos\omega_- t + C_+ \cos\omega_+ t)$$

$$x_2 = \tfrac{1}{2}(C_- \cos\omega_- t - C_+ \cos\omega_+ t) \qquad (৪\text{-}৫.১৩)$$

৪-৬. যুগ্ম স্পন্দনে শক্তির আলোচনা :

ক. শক্তির পরিমাণ : স্পন্দকদ্বয়ের মোট গতিশক্তি

$$T = \tfrac{1}{2}m_1\dot{x}_1^2 + \tfrac{1}{2}m_2\dot{x}_2^2$$

মোট স্থিতিশক্তি $V=\frac{1}{2}s_1x_1^2+(\frac{1}{2}s_2x_2^2-s_3x_1x_2)$

সুতরাং তাদের মোট শক্তি $=T+V=W$

$$=\frac{1}{2}(m_1\dot{x}_1^2+m_2\dot{x}_2^2+s_1x_1^2+s_2x_2^2-2s_3x_1x_2)$$

এখন $x=x_1\sqrt{m_1}$, $y=x_2\sqrt{m_2}$ এবং $s=s_3/\sqrt{m_1m_2}$ ধরলে

$$W=\frac{1}{2}(\dot{x}^2+\dot{y}^2+\omega_1^2x+\omega_2^2y-2s_3xy) \qquad (৪\text{-}৬.১)$$

এবারে যদি x, y-কে স্বভাবী স্থানাংকে প্রকাশ করি, তাহলে

$$x=X\cos\alpha+Y\sin\alpha\ ;\ y=Y\cos\alpha-X\sin\alpha$$

এবং
$$\tan 2\alpha=\frac{2\tan\alpha}{1-\tan^2\alpha}=\frac{2s^2}{\omega_2^2-\omega_1^2} \qquad (৪\text{-}৬.২)$$

এবং
$$W=\frac{1}{2}(\dot{X}^2+\dot{Y}^2+\omega_+^2X^2+\omega_-^2Y^2) \qquad (৪\text{-}৬.৩)$$

$$=\frac{1}{2}(\omega_+^2A_+^2+\omega_-^2A_-^2) \qquad (৪\text{-}৬.৪)$$

যেখানে $X=A_+\cos(\omega_+t-\phi_+)$ এবং $Y=A_-\cos(\omega_-t-\phi_-)$ তাহলে মোট শক্তি দুই স্বভাবী স্থানাংক-অক্ষে স্পন্দনশক্তির যোগফল। ৪-৬.৪ সমীকরণ দেখায় যে স্বভাবী স্থানাংকে প্রকাশ করার শক্তির গাণিতীয় ব্যঞ্জক অনেক সরল হয়।

খ. শক্তির চলাচল ঃ যুগ্ম স্পন্দনে দুই স্পন্দকের মধ্যে শক্তি পর্যায়ক্রমে আদানপ্রদান হতে থাকে।

তাদের ভর m_1 এবং m_2 ধ'রে তাদের যেকোনটির স্বকীয় স্বভাবী শক্তির মান বার করলে $W=\frac{1}{2}mV_{max}^2=\frac{1}{2}m\omega_0^2A_t^2$

এখানে A_t যেকোন নিমেষে স্পন্দনবিস্তার—যুগ্ম স্পন্দনে চালকের স্পন্দনবিস্তার সময়ের সঙ্গে কমে। m_1-এর ক্ষেত্রে ৪-৪.১০ থেকে t নিমেষে স্পন্দনবিস্তার এবং শক্তি যথাক্রমে

$$A_t=x_0\cos\tfrac{1}{2}\omega_0kt$$

এবং
$$W_1=\tfrac{1}{2}m_1\omega_0^2x_0^2\cos^2\tfrac{1}{2}\omega_0kt.$$

আর m_2-র ক্ষেত্রে
$$W_2=\frac{1}{2}m_2\omega_0^2x_0^2\frac{m_1}{m_2}\sin^2\tfrac{1}{2}\omega_0kt$$

$$=\tfrac{1}{2}m_1\omega_0^2.\,x_0^2\sin^2\tfrac{1}{2}\omega_0kt \qquad (৪\text{-}৬.৫)$$

৪-৬.৫ সমীকরণ-দুটি থেকে আমরা দেখতে পাচ্ছি যে

(১) আদিতে ($t=0$) যুগ্ম সংস্থার সমস্ত শক্তি m_1 বা চালকভরে সংহত,

(২) সময় বাড়ার সঙ্গে m_2-তে শক্তি বাড়ছে এবং m_1-এ কমছে অর্থাৎ শক্তির স্থানান্তর হচ্ছে,

(৩) $t=T/4$ মুহূর্তে সমস্ত শক্তি m_2-তে সংহত হয়েছে ($\omega T=2\pi$), m_1-এ কোন শক্তি নেই,

(৪) তার পরে m_2-তে শক্তি কমছে, m_1-এ বাড়ছে অর্থাৎ শক্তিপ্রবাহ বিপরীতমুখী (4.2 চিত্র দেখ)

(৫) মোট শক্তি $W_1+W_2=\frac{1}{2}(m_1+m_2)\ \omega_0{}^2x_0{}^2=$ ধ্রুবক, কারণ স্পন্দন অবাধ ধরা হয়েছে।

গ. **অনুনাদ :** ৪-৫.১০ সমীকরণ আলোচনা প্রসঙ্গে দেখা গেছে

$$\omega_+=\sqrt{\omega_0{}^2+s}=\omega_0+s/2\omega_0$$

আর $$\omega_-=\sqrt{\omega_0{}^2-s}=\omega_0-s/2\omega_0$$

কাজেই অভিন্ন কম্পাংকের দুই স্পন্দকের যৌথ কম্পাংক তাদের স্বকীয় কম্পাংক থেকে $s/2\omega_0$ বেশী বা কম হবে। স্পন্দনের সুরুতে $x_1/x_2=\sqrt{m_2/m_1}$ থাকলে স্বভাবী কম্পাংক কম আর সুরুতে সেই অনুপাতই ঋণাত্মক হলে স্বভাবী কম্পাংক বেশী হয়। অন্য কোন ভাবে স্পন্দন সুরু হলে গতি দুই স্পন্দনাংকের উপরিপাতিত গতি হবে। গোড়ায় ($t=0$) m_1এর সরণ x_0 এবং m_2-কে সাম্য অবস্থানে রেখে স্পন্দন সুরু করলে ৪-৫.১১ সমীকরণের বাস্তব অংশ নিয়ে পাব

$$x_1=\tfrac{1}{2}x_0\left[\cos(\omega_0+s/2\omega_0)t+\cos(\omega_0-s/2\omega_0)t\right]$$
$$=x_0\cos\tfrac{1}{2}\omega_0 st.\ \cos\omega_0 t$$

$$x_2=\tfrac{1}{2}\ x_0\sqrt{\frac{m_1}{m_2}}\left[\cos(\omega_0+s/2\omega_0)t-\cos(\omega_0-s/2\omega_0)t\right]$$

$$=\sqrt{\frac{m_1}{r_{\cdot}}}.\ x_0\sin\tfrac{1}{2}\omega_0 st.\ \sin\omega_0 t \qquad (৪\text{-}৬.৬)$$

অর্থাৎ দুই স্পন্দনের স্পন্দনবিস্তার যথাক্রমে $x_0\cos\omega_0 st/2$ এবং $x_0\sqrt{m_1/m_2}\sin\omega_0 st/2$; দুয়েরই স্পন্দনাংক $\omega_0 s/2$ $[=\frac{1}{2}\times(\omega_++\omega_-)]$ এবং দুই বিস্তারের মধ্যে দশাভেদ $\pi/2$; সুতরাং একটি

স্পন্দকের স্পন্দনবিস্তার যখন চরম, অন্যটির তখন অবম (4.2 চিত্র)—একটি থেকে অন্যটিতে $s/2\pi n_0$ কম্পাংকে স্পন্দন স্থানান্তর হচ্ছে। সরণবিস্তার পর্যায়ক্রমে কেবলই বদলাচ্ছে সুতরাং যুগ্ম স্পন্দন সরল দোলন নয়। 4.2 চিত্ররূপ দেখে বলা যায় যে ω_+ এবং ω_- স্পন্দনাংক উপরিপাতিত হয়ে $\pi/2$ দশাভেদে দুটি স্বরকম্প সৃষ্টি করছে।

৪-৭. যুগ্ম ও পরবশ কম্পনের তুলনা :

আগেই বলা হয়েছে যে পরবশ কম্পন যুগ্ম কম্পনেরই বিশিষ্ট রূপ; পরবশ কম্পনে স্পন্দক (১) চালক থেকে শক্তি আহরণ করে কিন্তু ফিরিয়ে দেয় না; (২) নিয়মিত অবস্থায় স্পন্দনবিস্তার অপরিবর্তিত থাকে; (৩) স্পন্দনাংক চালকের সমানই হয়; এবং (৪) গতি পর্যাবৃত্ত হয়।

যুগ্ম স্পন্দনে বৈশিষ্ট্যগুলি অনেক আলাদা। এক্ষেত্রে (১) চালক ও গ্রাহকের মধ্যে শক্তিবিনিময় হতে থাকে অর্থাৎ শক্তিপ্রবাহ উভয়মুখী, (২) স্পন্দনবিস্তার পর্যায়ক্রমে বাড়ে কমে, (৩) স্বভাবী স্পন্দনাংক দুই স্পন্দকের স্পন্দনাংক থেকে আলাদা হয় এবং সেই তফাৎ যোজনমাত্রার (k বা s) সঙ্গে বাড়ে, আর (৪) সঠিকভাবে আরম্ভ না করলে যুগ্ম স্পন্দন সরল দোলন তো নয়ই, পর্যাবৃত্ত-ও সব সময় হয় না।

বিশেষ সর্তাধীনে যুগ্ম স্পন্দন থেকে পরবশ কম্পন পাওয়া যেতে পারে। ধরা যাক, স্পন্দকদের গতি বিপরীতমুখী সুতরাং স্পন্দনাংক ω_+, চালকের ভর m_1 এবং স্পন্দনবিস্তার A_t, দুইই গ্রাহকের তুলনায় অনেক বেশী এবং যোজন (k) দুর্বল। তাহলে ৪-৫.৭ সমীকরণ থেকে

$$x_1 = z_1/\sqrt{m_1} = \frac{C_+}{\sqrt{m_1}} \cdot \cos\alpha . e^{j\omega_+ t}$$

$$x_2 = z_2/\sqrt{m_2} = -\frac{C_+ \sin\alpha}{\sqrt{m_2}} e^{j\omega_+ t} = -\sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \cdot x_1 \tan\alpha$$

$$= \frac{s_3 x_1}{(\omega_2^{\,2} - \omega_+^{\,2})} \sqrt{m_1/m_2} \text{ [৪-৫.৮ সমীকরণ দেখ]}$$

$$= \frac{s_3 x_1}{s_2 - m_2 \omega_+^{\,2}} \qquad \text{(৪-৭.১)}$$

এই সমীকরণের $s_3 x_1$-কে m_1 ভরের s_1 সরণে উদ্ভূত বল হিসাবে ধরা যায়; এই বল যোজক স্প্রিং-এর মাধ্যমে m_2 ভরের ওপর প্রযুক্ত। আর

$(s_2 - m_2\omega_+^2)$-কে ω_+ স্পন্দনাংকে m_2-র যান্ত্রিক বাধের সমানুপাতিক বলা চলে। তাহলে

$$x_2 = \frac{s_2 x_1}{s_2 - m_2\omega_+^2} = \frac{s_2 C_+ e^{j\omega_+ t} \cos\alpha / \sqrt{m_1}}{s_2 - m_2\omega_+^2}$$

$$= \frac{F_0 e^{j\omega_+ t}}{\omega_+(s_2/\omega_+ - m_2\omega_+)} = \frac{F(t)}{z_2\omega_+} \qquad (৪\text{-}৭.২)$$

সুতরাং m_1 চালক এবং m_2-র মধ্যে তার যোজন (s) দুর্বল হলে পরবশ কম্পনের পরিচিত সমীকরণ (৩-৪.৮) পাওয়া গেল।

এবারে আলোচ্য, ঘর্ষণবাধা না থাকলেও কেন একটিমাত্র স্পন্দনাংকে স্পন্দকের সাড়া বেশী হতে পারে না। পরবশ স্পন্দনে সাড়া খুব বেশী হতে হলে ঘর্ষণ নামমাত্র হওয়া চাই ; এখন n_1 কম্পাংকের স্পন্দককে যদি সম-কম্পাংক চালক দিয়ে উত্তেজিত করা যায় তাহলে কারুরই স্পন্দনাংক $\omega_0(=2\pi n_1)$ থাকবে না, হবে $(\omega_0 \pm s/2\omega_0)$। n_1 কম্পাকে সাড়া খুব বেশী ব'লেই সেই কম্পাংকে স্পন্দন সম্ভব নয়।

৪-৮. পরবশ যুগ্ম স্পন্দন :

যুগ্ম স্পন্দকযুগলের ওপর প্রত্যাবর্তী চালক বল ক্রিয়া করলে যৌথভাবে তাদের পরবশ কম্পন হবে। ধরা যাক, প্রথম স্পন্দকটির ওপর $Fe^{j\omega t}$ সমঞ্জস বল ক্রিয়া করবে এবং দ্বিতীয় স্পন্দকটি চালিত হবে। তাদের স্পন্দনশক্তি যোজন-উদ্ভূত। দার্ঢ্য-যোজিত যুগ্ম স্পন্দনে গতির সমীকরণ হবে

$$\ddot{z}_1 + \omega_1^2 z_1 - k z_2 = f e^{j\omega t} \; [f = F/m_1]$$

$$\ddot{z}_2 + \omega_2^2 z_2 - k z_1 = 0 \qquad (৪\text{-}৮.১)$$

যেহেতু শেষ পর্যন্ত নিয়মিত স্পন্দন চালক বলের কম্পাংকেই হবে সেইহেতু সমাধান হিসাব ধরি

$$z_1 = Ae^{j\omega t} \quad \text{এবং} \quad z_2 = Be^{j\omega t}$$

$$\text{এবং} \quad \ddot{z}_1 = -\omega^2 Ae^{j\omega t} \quad \text{এবং} \quad \ddot{z}_2 = -\omega^2 Be^{j\omega t}$$

৪-৮.১ সমীকরণে এই মান বসালে হবে

$$A\,(\omega_1^2 - \omega^2) - kB = f$$

$$\text{এবং} \quad B\,(\omega_2^2 - \omega^2) - kA = 0$$

দ্বিতীয় সমীকরণ থেকে $A = B\ (\omega_2{}^2 - \omega^2)/k$; প্রথম সমীকরণে A-র এই মান বসিয়ে পাব

$$B\left[\frac{\omega_2{}^2 - \omega^2}{k}(\omega_1{}^2 - \omega^2) - k\right] = f$$

$$\therefore \quad B = \frac{kf}{(\omega_1{}^2 - \omega^2)(\omega_2{}^2 - \omega^2) - k^2} \qquad (৪\text{-}৮.২)$$

এবং
$$A = \frac{(\omega_2{}^2 - \omega^2)f}{(\omega_1{}^2 - \omega^2)(\omega_2{}^2 - \omega^2) - k^2}$$

$$\therefore \quad x_1 = z_1/\sqrt{m_1} = \frac{F(\omega_2{}^2 - \omega^2)e^{j\omega t}}{\sqrt{m_1}[(\omega_1{}^2 - \omega^2)(\omega_2{}^2 - \omega^2) - k^2]}$$

এবং
$$x_2 = z_2/\sqrt{m_2} = \frac{kFe^{j\omega t}}{\sqrt{m_1 m_2}[(\omega_1{}^2 - \omega^2)(\omega_2{}^2 - \omega^2) - k^2]}$$

$$= \frac{s_8 F e^{j\omega t}}{(\omega_1{}^2 - \omega^2)(\omega_2{}^2 - \omega^2) - k^2}$$

এখন $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ হলে $B \to \infty$ হবে যখন $(\omega_0{}^2 - \omega^2) - k^2 = 0$

$$\therefore \quad \omega^2 = \omega_0{}^2 - k \text{ এবং } \omega_+ = \sqrt{\omega_0{}^2 - k} \qquad (৪\text{-}৮.৪)$$

$$\text{আর} \quad \omega_- = -\sqrt{\omega_0{}^2 - k}$$

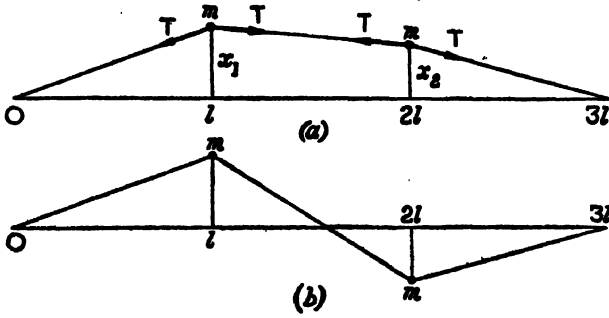
এখানে ω_+ এবং ω_- অনুনাদী কম্পাংক। তখন B এবং A-র মান অসীম। বাস্তব ক্ষেত্রে ঘর্ষণবল থাকায় A এবং B সীমিত মান—আমরা আলোচনায় তা উপেক্ষা করেছি। পরবশ যুগ্ম কম্পনে একাধিক অনুনাদী শীর্ষ থাকে।

বিদ্যুৎপ্রবাহের নানা বর্তনীর মধ্যে (যথা ট্রান্সফর্মার) বৈদ্যুতিক যোজন গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা নেয়।

৪-৯. যুগ্ম স্পন্দনের একটি উদাহরণ: ভারাক্রান্ত তার (Loaded string):

একটি স-টান তারের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে দুই বা বেশী ভারকণা চাপিয়ে স্পন্দন ঘটালে ভর বা দার্ঢ্য-যোজিত যুগ্ম স্পন্দনের উদাহরণ মেলে। অভিকর্ষের ক্রিয়া অগ্রাহ্য করতে আমরা ধরে নেব যে, তারটির স্পন্দন অনুভূমিকতলে ঘটছে এবং সে স্পন্দন ঘর্ষণবাধা-রহিত।

এক কণাযুক্ত তারের স্পন্দন—ভর এবং টানের ওপর নির্ভরশীল। কণা

একাধিক হলে একটির স্পন্দন অন্যগুলির দ্বারা প্রভাবিত হবে। ধরা যাক, তারের ভর নগণ্য, দৈর্ঘ্য $3l$ এবং দুই প্রান্ত থেকে l দূরত্ব দূরে সমভর (m)

চিত্র 4.5—ভারাক্রান্ত তারে যুগ্ম স্পন্দন

দুটি কণা আছে। তাদের সরণ x_1 এবং x_2 অল্প (4.5 চিত্র); তাতে টান T-র কোন পরিবর্তন হয় না।

এখন কণাগুলির ওপর সক্রিয় বলের তারের আড়াআড়ি দিকে ক্রিয়া বিবেচনা করলে গতির সমীকরণ দাঁড়াবে (ছবিতে y-এর জায়গায় x আছে)

$$m\ddot{y}_1 = -(T/l)y_1 - T(y_1 - y_2)/l$$

$$= -(2T/l)y_1 + (T/l)y_2 \qquad (৪\text{-}৯.১)$$

এবং $m\ddot{y}_2 = -(T/l)y_2 - T(y_2 - y_1)/l$

$$= -(2T/l)y_2 + (T/l)y_1$$

$$\therefore \quad m(\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) = -(T/l)(y_1 + y_2)$$

এবং $m(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_2) = -(3T/l)(y_1 - y_2)$

$$\therefore \quad (\ddot{y}_1 + \ddot{y}_2) + \frac{T}{ml}(y_1 + y_2) = 0 \qquad (৪\text{-}৯.২)$$

এবং $(\ddot{y}_1 - \ddot{y}_2) + \dfrac{3T}{ml}(y_1 - y_2) = 0$

দুটি সমীকরণ সরল দোলজাতীয়। সুতরাং তাদের সমাধান করলে দাঁড়াবে

$$y_1 + y_2 = a \cos \sqrt{T/ml}.\, t + b \sin \sqrt{T/ml}.\, t$$

এবং $y_1 - y_2 = a' \cos \sqrt{3T/ml}.\, t + b' \sin \sqrt{3T/ml}.\, t$

(৪-৯.৩)

তাহলে এদের যোগ এবং বিয়োগ ক'রে যথাক্রমে y_1 এবং y_2-র মান পাওয়া যাবে। কাজেই দুটি ভরের স্পন্দনাংক যথাক্রমে $\sqrt{T/ml}$ এবং $\sqrt{3T/ml}$; নিম্ন কম্পাংকে বিস্তারের অনুপাত 1 এবং গতি একমুখী ; উচ্চ কম্পাংকে অনুপাত -1 এবং গতি বিপরীতমুখী (৪-৪.১৩ সমীকরণ)।

প্রশ্নাবলী

১। যুগ্ম স্পন্দন বলতে কি বোঝ ? স্বভাবী স্থানাংক, স্বভাবী স্পন্দনরীতি, স্বভাবী কম্পাংক কাকে বলে ? m_1 এবং m_2 ভরের দুই স্পন্দকের জাড্য-যোজন হলে তার গতির সমীকরণ স্বভাবী কম্পাংক এবং স্বভাবী স্পন্দনরীতিতে বিস্তার অনুপাত নির্ণয় কর।

তারা যদি দার্ঢ্য-যোজিত হয় তাহলেই বা কি হবে ?

২। 4-4. ছবিতে স্পন্দক-দুটির ভর (m) সমান এবং তিনটি স্প্রিং-এর বল-গুণাংক (s) সমান হলে দেখাও যে

$m\ddot{x}_1 = s(x_2 - 2x_1)$ এবং $m\ddot{x}_2 = s(x_1 - 2x_2)$

স্পন্দক-দুটির সরল দোলন হলে সংস্থাটির স্পন্দনাংক কত ? উঃ $\sqrt{s/m}$

৩। দৃঢ় অবলম্বন থেকে s_1 দার্ঢ্যবিশিষ্ট স্প্রিং দিয়ে m_1 ভর ঝোলানো হ'ল। m_1 থেকে s_2 দার্ঢ্যের দ্বিতীয় স্প্রিং দিয়ে m_2 ভর ঝোলানো হল। যুক্ত দোলকটি যদি কেবল খাড়া রেখায় স্পন্দিত হতে পারে তাহলে দেখাও

(ক) $m_1\ddot{y}_1 = -(s_1 + s_2)y_1 + s_2 y_2$ এবং $m_2\ddot{y}_2 = s_2(y_2 - y_1)$

(খ) $\omega_1^2 = (s_1 + s_2)/m_1$, $\omega_2^2 = s_2/m_2$ এবং $k = s_2/\sqrt{m_1 m_2}$ হলে দেখাও যে স্বভাবী স্পন্দনাংক সাধারণ দার্ঢ্য-যোজনের মতোই হবে।

৪। সমকম্পাংকের কিন্তু অসমভরের দুই স্পন্দক স্প্রিং দিয়ে যুক্ত হলে স্বভাবী স্পন্দনে তাদের স্পন্দনবিস্তার স্পন্দক-ভরের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হবে দেখাও।

৫

তরঙ্গগতি

(Wave motion)

৫-১. সূচনা :

কোন আলোড়নের শক্তি এক জায়গা থেকে অন্যত্র ছড়িয়ে পড়ার ঘটনাকে তরঙ্গগতি বলে। উৎসে আলোড়ন ক্ষণস্থায়ী বা দীর্ঘস্থায়ী হতে পারে; তরঙ্গগতি স্থাণু হতে পারে, সচল হতে পারে, তার প্রচারের জন্য মাধ্যম লাগতে পারে আবার নাও লাগতে পারে। আলোড়নের উৎপত্তি এবং প্রকৃতি নানাবিধ হতে পারে। সংজ্ঞা হিসাবে বলা যায় **দেশ** (space) **এবং কাল** (time) **সাপেক্ষে পুনরাবৃত্ত আলোড়নই তরঙ্গ।** বাস্তব মাধ্যমে আলোড়ন বলতে, সামগ্রিকভাবে তার চাপ, ঘনত্ব বা উষ্ণতার, বিচ্ছিন্নভাবে তার কণাগুলির সরণ, বেগ বা ত্বরণের, ক্ষণিক বা পর্যাবৃত্ত পরিবর্তন ধরা যেতে পারে। **তরঙ্গগতিতে বিক্ষুব্ধ বা আলোড়িত অবস্থারই প্রসার ঘটে, মাধ্যমের কণাগুলির স্থায়ী সরণ হয় না।**

বিনা মাধ্যমে তরঙ্গগতির প্রধানতম উদাহরণ, বিদ্যুচ্চুম্বকীয় তরঙ্গমালা—বেতার, তাপ, আলো, রঞ্জন-রশ্মি, γ-রশ্মি প্রভৃতি; তাছাড়া পদার্থতরঙ্গের (matter waves) ক্ষেত্রেও মাধ্যম লাগে না। আমরা কিন্তু বাস্তব মাধ্যমে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গমালাতেই আলোচনা সীমিত রাখব। **স্বন- বা শব্দতরঙ্গ বাস্তব মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য স্থিতিস্থাপক তরঙ্গমাত্র।** বাস্তব মাধ্যমে আবার অন্য শ্রেণীর তরঙ্গের উৎপত্তি ও প্রসারও সম্ভব—যেমন খোলা, বিস্তৃত জলতলে লহরীমালা (ripples); জলে ঢিল ফেললে বা তার ওপর দিয়ে মৃদু বাতাস বইলে যে আলোড়ন আমরা দেখি তাদেরই লহরীমালা বলি। জলের তলটান (surface tension) এবং অভিকর্ষের ক্রিয়ায় এদের উৎপত্তি; গভীর জলে যে বৃত্তাকার ঢেউ দেখা যায় তাদের উৎপত্তি অভিকর্ষের ক্রিয়াতে ঘটে।

স্থিতিস্থাপক স্পন্দনেই মাধ্যমে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের সৃষ্টি হয়; তাদের দুয়েরই উৎপত্তি ও বিস্তারের জন্যে মাধ্যমের জড়তা এবং স্থিতিস্থাপকতা দুই

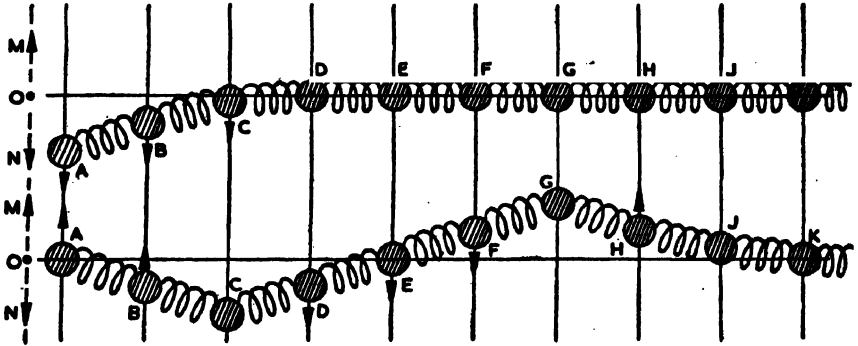
ধর্মই থাকা দরকার। স্পন্দনের বেলায় এই দুই ধর্ম স্পন্দকের মধ্যেই সীমিত (localised) থাকবে (স্পন্দনশীল স্প্রিং-এর কথা ভাবো) আর তরঙ্গগতির বেলায় এই দুই ধর্ম মাধ্যমের সর্বত্রই বণ্টিত (distributed) বা পরিব্যাপ্ত থাকবে। স্প্রিংটির ওঠানামাকালে জড়তা ও স্থিতিস্থাপকতা তাতেই সীমিত, কম্পনশক্তিও তাতে নিহিত। কিন্তু সেই স্পন্দন বায়ুতে বা জলে যে আলোড়ন ঘটায় তার ফলেই শক্তি মাধ্যমের সর্বত্র তরঙ্গাকারে ছড়িয়ে পড়ে ; কেননা জড়তা ও স্থিতিস্থাপকতা মাধ্যমের সর্বত্রই ব্যাপ্ত থাকে।

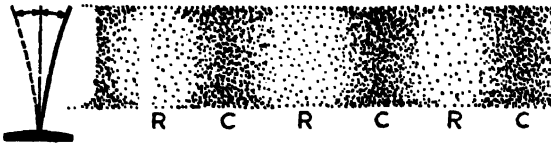
৫-২. স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের উৎপত্তি :

সাধারণত স্পন্দক, হয় দৈর্ঘ্য বরাবর (অনুদৈর্ঘ্য), নয় তার আড়াআড়ি দিকে (অনুপ্রস্থ) স্পন্দিত হতে পারে। মাধ্যমের কণাগুলির ক্রমান্বয়ে স্পন্দনেই যখন তরঙ্গ হয় তখন তরঙ্গও এই দু'রকমেরই হতে পারে। আমরা সেরকম দুটি উদাহরণ আলোচনা করব।

(১) অনুপ্রস্থ তরঙ্গ : অনেকগুলি ছোট ছোট বলকে পরপর ছোট ছোট স্প্রিং দিয়ে টান ক'রে আটকানো (5.1 চিত্র) যাক ; সাঁতার-প্রতিযোগিতায় সাঁতারুর ট্র্যাক নির্দিষ্ট রাখতে এইরকম ব্যবস্থা দেখে থাকবে। বলগুলি যেন মাধ্যমের ঘনীভূত জড়তা-ধর্ম আর স্প্রিংগুলি যেন তার স্থিতিস্থাপকতা-ধর্মের প্রতিভূ। প্রথম বলটির (A) ওপর একটি ঢিল ফেললে সে নিচে নামতে সুরু করবে। স্থানচ্যুতি মানেই বিকৃতি, সুতরাং সংশ্লিষ্ট স্প্রিং-এ বিপরীতমুখী পীড়ন বলের উদ্ভব হবে। বলটির স্থানচ্যুতি যতই বাড়বে হুকের সূত্রানুযায়ী তার বিমুখী প্রত্যানয়ক বলও ততই বাড়বে। ফলে বলটি মৃদুগতি হতে হতে এক সময়ে থেমে যাবে, তারপর উল্টোদিকে ক্রমবর্ধিষ্ণু বেগে উঠবে। সাম্যাবস্থায় পৌঁছে কিন্তু বলটি থামবে না, গতিজড়তার কারণে একই দিকে এগোতে থাকবে ; ফলে মাধ্যমে বিপরীতমুখী বিকৃতি ঘটাবে। প্রত্যানয়ক বল মধ্যকবিন্দু অভিমুখী, কাজেই বলের ঊর্ধ্বগতি এক সময়ে থেমে যাবে ; তারপর বলটি নিচে নামতে নামতে একসময়ে থামবে, আবার উল্টোমুখে চলতে থাকবে। এইভাবেই বলটি ওপর-নিচে করতে থাকবে।

এখন দ্বিতীয় বলটি (B) স্প্রিং দিয়ে প্রথম বলের সঙ্গে যুক্ত থাকায় প্রথম বলের স্পন্দন, সামান্য পরে দ্বিতীয়ে সঞ্চারিত হবে এবং সেও প্রথমের মতো ওঠানামা করতে থাকবে। কালক্রমে অন্যান্য বলগুলিতেও স্পন্দন ছড়িয়ে পড়বে। মনে করা হয়, কঠিন মাধ্যমে পরপর কণাগুলি আসক্তিবল দিয়ে

যুক্ত ; এই বলই অণুগুলির মধ্যে স্প্রিং-এর কাজ করে। এখানে আলোড়ন বা তরঙ্গের গতিমুখ এবং বলগুলির স্পন্দন পরস্পর আড়াআড়ি দিকে ঘটে।

চিত্র 5.1—অনুপ্রস্থ তরঙ্গের প্রতিকৃতি

(২) **অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ :** 5.2 চিত্রে একটা খাড়া পাত দেখানো হয়েছে, তার তলার প্রান্ত শক্ত ক'রে আটকানো। তার গায়ে বায়ুকণাগুলি সমঘনত্বে থাকায় তাদের সমবেধ সমান্তরাল কয়েকটি স্তরে বিভক্ত ব'লে ধরা যায়।

চিত্র 5.2—বায়ুতে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ

এখন ধরা যাক, পাতের মুক্ত প্রান্ত কাঁপছে। যখন ডানে যাচ্ছে তখন বায়ুকণাগুলির ওপর চাপ বাড়ছে, ফলে তাদের মধ্যে দূরত্ব কমছে অর্থাৎ স্তরগুলি সংকুচিত হচ্ছে ; পাতটির শীর্ষ যখন বাঁয়ে যাচ্ছে তখন বায়ুকণাগুলির ওপর চাপ স্বাভাবিকের চেয়ে কমছে, কাজেই তাদের মধ্যে বিচ্ছেদ বাড়ছে অর্থাৎ স্তরের তনুভবন হচ্ছে। চিত্রে কয়েকটি পূর্ণ স্পন্দনের পর বায়ুকণাগুলির অবস্থা দেখানো হয়েছে। পাতের স্পন্দনের ফলে বায়ুর অণুগুলি নিজেদের স্থির অবস্থার (এখানে তাদের উষ্ণতাসৃষ্ট অক্রম গতি অগ্রাহ্য করা হচ্ছে) ডাইনে-বাঁয়ে নড়াচড়া করতে থাকবে আর বায়ুর স্থিতিস্থাপকতাধর্মের বশে

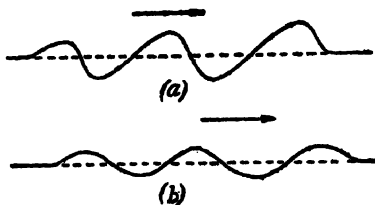
স্তরের ঘনীভূত (C) এবং তনুভূত অবস্থা (R) নির্দিষ্ট বেগে ডানদিকে এগিয়ে চলবে। এক্ষেত্রে তরঙ্গের প্রসার এবং কণার সরণ সমরেখ।

ওপরের উদাহরণ-দুটিই **সচল স্থিতিস্থাপক** তরঙ্গগতি; তাদের দুটি বৈশিষ্ট্য ওপরের আলোচনা থেকে আমরা পাচ্ছি—

(১) কোন স্থিতিস্থাপক মাধ্যমের এক অংশে শক্তি যুগিয়ে বিকৃতি ঘটালে সেই শক্তি তরঙ্গবাহিত হয়ে অন্যত্র ছড়িয়ে পড়ে; আন্দোলন বা বিক্ষুব্ধ অবস্থাই ছড়াতে থাকে, মাধ্যমের কোন অংশেরই **স্থায়ী** সরণ হয় না।

(২) অল্প অল্প কালান্তরে, কণাপরম্পরা তাদের স্থির অবস্থানের থেকে এদিক ওদিক আনাগোনা করতে থাকে।

সুতরাং সংজ্ঞা হিসাবে বলা যায়—**যে বিক্ষোভ মাধ্যমের কণাগুলিতে (ক) স্থির-অবস্থান সাপেক্ষে এদিক ওদিক আন্দোলন ঘটায় কিন্তু (খ) স্থায়ী সরণ না ঘটিয়ে (গ) মাধ্যমের এক অংশ থেকে অন্যত্র শক্তি পৌঁছে দেয়, তাকে সচল তরঙ্গ বলে।**

আলোচনা থেকে আরও বোঝা যায় যে (ক) মাধ্যমের যেকোন বিন্দুটির সরণ মাত্রা কাল-নির্ভর (খ) কোন এক নিমেষে ভিন্ন ভিন্ন কণার সরণমাত্রা তার অবস্থান তথা দেশ-নির্ভর—অর্থাৎ **সচল তরঙ্গ মাধ্যমের স্পন্দনশীল কণাগুলির যৌথ কাল-ও দেশ-নির্ভর অবস্থা।** কোন গণিতীয় প্রতিরূপে যদি সময় ও স্থান নির্বিশেষে আন্দোলন নির্দেশ করা সম্ভব হয় তবে তাকে তরঙ্গগতির সমীকরণ বলে। পর্যাবৃত্তি—তরঙ্গমাত্রেরই অবশ্য পালনীয় বৈশিষ্ট্য নয়—যেমন জলে ঢিল ফেললে দেখা যায়, কয়েকটি মাত্র তরঙ্গশীর্ষ ও তরঙ্গপাদের সৃষ্টি হয় এবং দূরত্ব ও কালভেদে তাদের আকার বদলাতে

চিত্র 5.3—বাস্তবে তরঙ্গগড়ন

থাকে (5.3 চিত্র)। বাস্তব তরঙ্গমাত্রেরই (১) রূপ তথা আকার তথা গড়নের (wave form) ক্রমপরিবর্তন, (২) সরণবিস্তারের ক্রম-হ্রাস এবং (৩) নিত্য পর্যাবৃত্তির অভাবই—চোখে পড়ে।

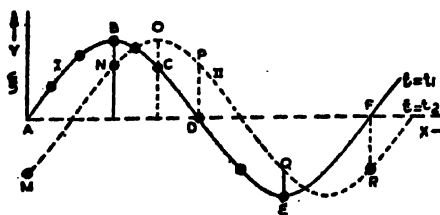
কিন্তু তরঙ্গ সম্পর্কে তাত্ত্বিক আলোচনার ভিত্তি—সুষম পর্যাবৃত্ত তরঙ্গ ; তাদের আকার বা গড়ন বদলায় না, বিস্তার কমে না, কাল ও দেশ দুয়ের সাপেক্ষেই তারা পর্যাবৃত্ত। এইজাতীয় তরঙ্গেরা একটি মাত্র পথ ধরেই এগোয়—আশেপাশে মোটেই ছড়ায় না। এরা আদর্শ এবং অবাস্তব।

৫-৩. তরঙ্গের ভিন্ন ভিন্ন শ্রেণীর উৎপত্তির কারণ :

তরঙ্গগতির অভিমুখ সাপেক্ষে স্পন্দনশীল কণার সরণের দিক বিচার করেই সাধারণত তরঙ্গের শ্রেণীভেদ করা হয়। স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ মোটামুটি তিন শ্রেণীর—অনুদৈর্ঘ্য, অনুপ্রস্থ এবং ব্যাবর্ত। কণার স্পন্দন আর তরঙ্গগতি সমরেখ তথা সমান্তরাল হলে তরঙ্গ অনুদৈর্ঘ্য, যেমন স্বনতরঙ্গ ; তারা যেখানে আড়াআড়ি, তরঙ্গ সেক্ষেত্রে অনুপ্রস্থ, যেমন সটান তারে সরণতরঙ্গ ; আর কণার স্পন্দন যদি তরঙ্গ-অভিমুখের লম্বতলে বৃত্তচাপীয় হয় (যেমন রডে মোচড় দিয়ে), তাহলে তরঙ্গ ব্যাবর্তশ্রেণীর হয়। এদের ছাড়াও তরঙ্গ নানা ধরনের হতে পারে। অগভীর জলে লহরীমালায় কণার সঞ্চারপথ তরঙ্গপথের সমান্তরালে উপবৃত্তীয়, গভীর জলে অভিকর্ষীয় তরঙ্গে কণার সঞ্চারপথ বৃত্তীয় হয়। স্ফটিকের মধ্যে কণার সরণপথ আর তরঙ্গপথের মধ্যে এক সূক্ষ্মকোণ থাকে, সে আমাদের নির্দেশিত কোন শ্রেণীতেই পড়ে না। উষ্ণতাতরঙ্গে আন্দোলনের কোন সঠিক দিক-নির্দেশ সম্ভব নয়।

সাধারণভাবে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের প্রকৃতি মাধ্যমের বিকৃতিবৈশিষ্ট্যের ওপর নির্ভর করে। একটি স্পন্দনশীল কণার স্পন্দন পরবর্তী কণার স্পন্দন কোন্‌দিকে ঘটাবে তার ওপরে উৎপন্ন তরঙ্গের শ্রেণী নির্ভর করে। যেমন, বাস্তব মাধ্যম-মাত্রেই আয়তন-বিকৃতিতে বাধা দেয় ব'লে কঠিন, তরল, বায়বীয় সবরকম মাধ্যমেই, সংকোচন বা প্রসারণ স্তর-পরম্পরায় অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের (5.2 চিত্র) আকারে ছড়ায়। আবার কঠিন মাধ্যম ছাড়া অনুপ্রস্থ বা কৃন্তন তরঙ্গ উৎপাদন সম্ভব নয় কেননা তাদের বেলায় একটি বিচলিত কণাকে পরের কণাটিকে নিজের সমান্তরালে নড়াতে পারা চাই। ভূকম্প (seismic) তরঙ্গে পৃথিবীর কঠিন ত্বকের মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য, অনুপ্রস্থ ও কৃন্তন তিন রকমেরই স্থিতিস্থাপক বিক্ষোভই থাকতে পারে ; যথাক্রমে সেকেণ্ডে 7·2 কিমি এবং 4·0 কিমি বেগে চ'লে তারা ভূকম্পবীক্ষণ-যন্ত্রে একাধিক সাড়া জাগায়। বিদ্যুচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ অনুপ্রস্থ শ্রেণীর বটে, কিন্তু মাধ্যম দরকার না হওয়ায় স্থিতিস্থাপকতাবৈশিষ্ট্যের কথা ওঠে না। স্ফটিকে আলোকতরঙ্গের বৈচিত্র্য, মাধ্যমের বিষমদৈশিকতা (anisotropy) থেকে আসে।

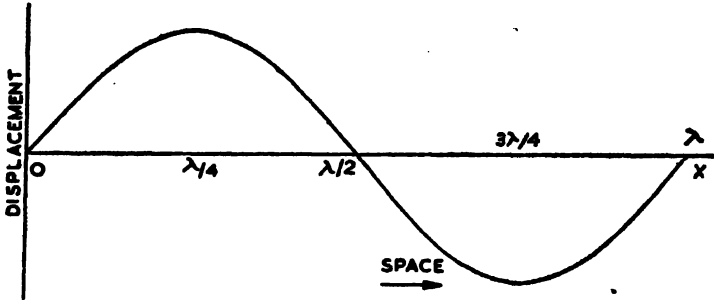
৫-৪. তরঙ্গগতি ও স্পন্দনদশা :

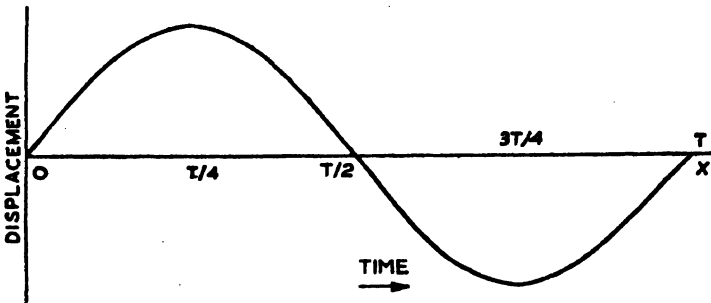
স্পন্দনশীল দীর্ঘ একটি স্প্রিং লক্ষ্য কর ; দেখবে যে তার প্রান্তের ভর বা যেকোন পাকের অবস্থান, বেগ, অভিমুখ সবই, এক কথায় স্পন্দনদশা, সদাই বদলাচ্ছে। কোন মুহূর্তে একটি পাকের স্পন্দনের যা অবস্থা, খানিকপরে অন্য আর এক পাকেরও তাই অবস্থা ঘটে। সমুদ্রতীরে ঢেউ লক্ষ্য করলে দেখা যাবে এক মুহূর্তে যেখানে তরঙ্গশীর্ষ, পরমুহূর্তে সেখানে তরঙ্গপাদ, আগের তরঙ্গশীর্ষ এগিয়ে এসে অন্যত্র পৌঁছেছে, অর্থাৎ তরঙ্গগতিতে এক কণার কোন নিমেষের স্পন্দনদশা পরমুহূর্তে অন্য কণায় সঞ্চারিত হয়েছে।

চিত্র 5.4—স্পন্দনদশার ব্যাপ্তি

5.4 চিত্রে $ABCDEF$ রেখা (I) t_1 নিমেষে অনুপ্রস্থ তরঙ্গবিক্ষুব্ধ মাধ্যমের কয়েকটি কণার বিচলিত অবস্থানগুলি নির্দেশ করছে, তার একটু পরে t_2 নিমেষে $MNOPQR$ রেখা (II) তাদেরই পরিবর্তিত অবস্থানগুলি দেখাচ্ছে—অর্থাৎ সচল তরঙ্গগতিতে স্পন্দনদশা তরঙ্গগতির অভিমুখে এগোতে থাকে।

তরঙ্গবিক্ষুব্ধ মাধ্যমে যেকোন নিমেষে যেকোন বিন্দু দিয়ে এমন এক তল টানা যায়, যার ওপর অবস্থিত সব কণাগুলিই সমদশা। এইরকম সমদশাগ্রস্ত কণাগুলির মধ্য দিয়ে টানা তলকে **তরঙ্গমুখ** (wave front) বলে। যে বেগে তরঙ্গমুখ এগোয় তাকে **তরঙ্গ-** বা **দশাবেগ** বলে। কেবলমাত্র অনন্ত দীর্ঘ, এককম্পাংক (monochromatic) তরঙ্গের বেলাতেই দশাবেগ অক্ষুণ্ণ থাকে ; বাস্তবক্ষেত্রে এইরকমের তরঙ্গ মেলে না, যদিও আমাদের আলোচনায় আমরা সেইরকমই ধরে নিই। তরঙ্গমুখের যেকোন বিন্দুতে টানা লম্বরেখাকে **রশ্মি** বলে। এই রশ্মিপথেই তরঙ্গবাহিত শক্তি চলে। সমসত্ত্ব, সমদৈশিক (isotropic) মাধ্যমের কোন বিন্দুতে আলোড়ন হলে সেই অবস্থা সব দিকে সমবেগে ছড়িয়ে পড়ে। অতএব আলোড়নকেন্দ্র থেকে সমদূরবর্তী সব কণাতেই স্পন্দনদশা অভিন্ন, কাজেই তরঙ্গমুখ গোলীয়।

কেন্দ্র থেকে অনেক দূরে তরঙ্গমুখের ছোট এক অংশ প্রায় সমতলীয় হয়; বা বিশেষ ব্যবস্থায়, যেমন লেন্‌সের সাহায্যে, গোলীয় তরঙ্গকে সমতলীয় তরঙ্গে রূপান্তরিত করা যায়। 5.9 চিত্রে এদের চেহারা দেখানো হয়েছে।

5.4 চিত্রে $ABCDEF$ রেখা t_1 মুহূর্তে, আর $MNOPQR$ রেখা t_2 মুহূর্তে মাধ্যমের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে সরণের বিশেষ অবস্থা চিহ্নিত করছে; কাজেই ঐ রেখা-দুটিকে ঐ মুহূর্তে মাধ্যমের সরণ-দেশান্তর (space

চিত্র 5.5—সরল দোলীয় সরণ-দেশান্তর রেখা

displacement) রেখা বলতে পারি; তাকে তরঙ্গরূপ বা তরঙ্গগড়ন বা তরঙ্গের ছাঁদ বলাও চলে। আসলে এই ছাঁদটি তরঙ্গের অগ্রগতির পথে যেকোন

চিত্র 5.6—সরল দোলীয় তরঙ্গে কাল-সরণ রেখা

মুহূর্তে সব কণাগুলির সরণদশা তথা বিচলিত অবস্থার স্থিরচিত্র (still photo) মাত্র (চিত্র 5.5)। তরঙ্গগতিতে মাধ্যম চলে না, চলে এই তরঙ্গরূপ বা

তরঙ্গছাঁদ। পরবর্তী আলোচনায় সরলীকরণের খাতিরে ধ'রে নেওয়া হবে যে, সচল তরঙ্গে তরঙ্গরূপ অক্ষুণ্ণ থাকে—যদিও বাস্তবে তা হয় না।

আবার ঐ রেখাটিরই যেকোন কণার পূর্ণ এক পর্যায়কাল ধ'রে যদি সময়ের সঙ্গে সরণের সম্পর্কের লেখচিত্র টানা যায় তাহলে সেই কণার সরণ-কালান্তর রেখা (চিত্র 1.6 বা 5.6) মেলে—তাকে ঐ কণার সরণের চলচ্চিত্র (cinematograph) বলা চলে। চিত্র 5.6 এবং 5.5 থেকে দেখা যায় যে, এক পর্যায়কাল জুড়ে একটি কণার ক্রমিক সরণের চলচ্চিত্র আর এক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মধ্যে অবস্থিত সব কণাগুলির যেকোন নিমেষের স্থিরচিত্র, এদের মধ্যে আকারে কোন তফাৎ নেই। তবে এই সিদ্ধান্ত কেবলমাত্র সরল সমঞ্জস তরঙ্গের (অর্থাৎ সরল দোলনে উদ্ভূত) বেলাতেই প্রযোজ্য।

৫-৫. সচল পর্যাবৃত্ত তরঙ্গগতির বৈশিষ্ট্য:

আগের আলোচনার সংক্ষিপ্তসার ক'রে এই বৈশিষ্ট্যগুলি পাওয়া যায়—

(১) জড় মাধ্যমের কোন অংশে অবিরাম স্পন্দন হতে থাকলে সুষম পর্যাবৃত্ত তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। তার ব্যাপ্তি-বেগ মাধ্যমের ঘনত্ব ও স্থিতিস্থাপক গুণাংকের ওপর নির্ভর করে।

(২) গতিমুখের সাপেক্ষে কণাস্পন্দন অনুদৈর্ঘ্য, অনুপ্রস্থ বা ব্যাবর্ত হতে পারে। তরঙ্গের গড়ন এবং বিস্তার অক্ষুণ্ণ থাকলে বিক্ষুব্ধ কণাগুলি একই কম্পাংকে স্পন্দিত হয়।

(৩) গতিপথ বরাবর কণাপরম্পরার স্পন্দন ভিন্ন ভিন্ন দশা কিন্তু এক এক তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) অন্তর অন্তর একই। কণা থেকে কণান্তরে স্পন্দনদশা সঞ্চারিত হয় এবং যেকোন দুই কণার মধ্যে দশাভেদ তাদের রৈখিক বিচ্ছেদের সমানুপাতিক।

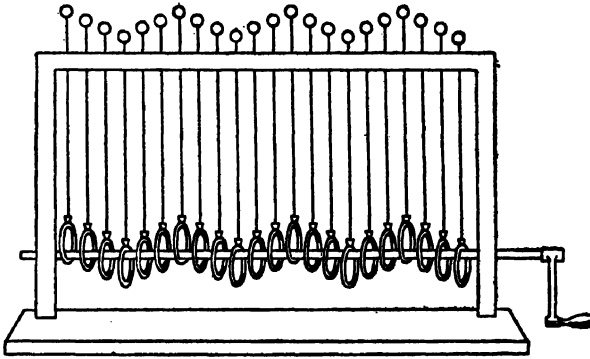
(৪) কাজেই পর্যাবৃত্ত তরঙ্গে পর্যাবৃত্তি (periodicity) দুই শ্রেণীর —একটি কালে, T সময় পরপর, অপরটি দেশে, λ দূরত্ব অন্তর অন্তর স্পন্দনদশা পুনরাবৃত্ত হয়; কাজেই দশাবেগ $c=\lambda/T$ দাঁড়ায়। তাছাড়া দুই পর্যাবৃত্তি তথা সরণ- এবং দেশ-কালান্তর রেখা অভিন্ন। তাই সংজ্ঞা হিসাবে বলা যায় যে

নির্দিষ্ট কাল ও দেশান্তরে কোন আলোড়নের পুনরাবির্ভাব হতে থাকলে, সে সচল পর্যাবৃত্ত তরঙ্গগতি।

(৫) তরঙ্গগতিতে রশ্মি-বরাবর শক্তির স্থানান্তর ঘটে।

(৬) অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ চললে মাধ্যমের প্রতিটি অংশে ঘনত্ব ও চাপের এবং কণা-সরণের একই পরিবর্তন পুনরাবৃত্ত হতে থাকে। এই বইতে আমরা এই-জাতীয় তরঙ্গেরই বিস্তারিত আলোচনা করবো।

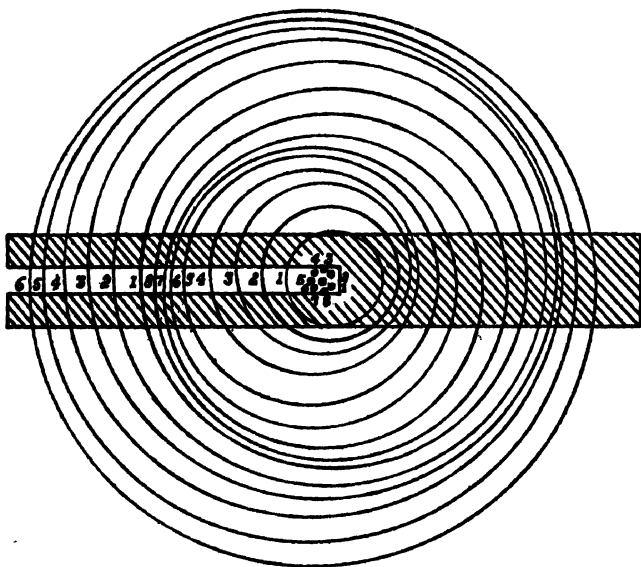
৫-৬. পর্যাবৃত্ত তরঙ্গগতির প্রদর্শনী ব্যবস্থা:

ক. **অনুপ্রস্থ তরঙ্গ-যন্ত্র** (চিত্র 5.7): এতে অনেকগুলি খাড়া সমদৈর্ঘ্য রডের মাথায় ছোট ছোট বল লাগিয়ে তাদের পাশাপাশি এক একটি উৎকেন্দ্রিক (eccentric) চাকার ওপর দাঁড় করানো হয়েছে। হাতল-লাগানো

চিত্র 5.7—অনুপ্রস্থ তরঙ্গ-যন্ত্র

একটা লম্বা রড চাকাগুলির মধ্য দিয়ে গেছে। হাতল ঘোরালে চাকাগুলিও ঘোরে তখন রডগুলি এবং তাদের মাথায় বলগুলিও ওঠানামা করে।

স্থির অবস্থায় বলগুলির অবস্থান যেকোন নিমেষে সরণ-দেশান্তর রেখা বা তরঙ্গগড়ন নির্দেশ করে। হাতল ঘোরালে প্রতিটি বলই নিজের জায়গায় দাঁড়িয়ে ওঠানামা করতে থাকে, প্রতি মুহূর্তেই তাদের প্রত্যেকেরই অবস্থান বদলাতে থাকে। কাজেই যেকোন বলেরই সরণদশা ক্রমাগত বদলায় এবং সেই দশাই ডাইনে বা বাঁয়ে চলতে দেখা যায়। এছাড়াও যেকোন বলের পূর্ণ

স্পন্দনে যতখানি সময় লাগে তাতে স্পন্দনদশা বা তরঙ্গছাঁদ যে এক পূর্ণ তরঙ্গদৈর্ঘ্য অতিক্রম করে, তাও চোখে পড়ে।

খ. অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ-যন্ত্র (ক্রোভা-উদ্ভাবিত চক্র): অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে একটি ঘনীভূত অবস্থা যে একটি তনূভূত অবস্থাকে অনুসরণ করে তা এই চক্রের সাহায্যে সহজেই দেখানো যায়। ক্রোভা-চক্র [চিত্র 5.8(a)] তৈরী করতে শক্ত একখণ্ড পিচবোর্ডের ওপর ছোট একটি বৃত্ত টেনে তার পরিধি বরাবর সমব্যবধানে কয়েকটি বিন্দু নেওয়া হয়; আমরা আটটি নিয়েছি। প্রথম বিন্দুকে কেন্দ্র ক'রে প্রথম বৃত্তের চেয়ে আর একটু বড় ক'রে 1 চিহ্নিত বৃত্ত টানা হ'ল; 2-কে কেন্দ্র ক'রে আর একটু বড় দ্বিতীয় বৃত্ত টানা হ'ল। এইভাবে পরপর বিন্দুগুলিকে কেন্দ্র ধ'রে ব্যাস সমান মাপে বাড়িয়ে বাড়িয়ে মোট

চিত্র 5.8(a)—ক্রোভা-চক্র

চারটি বৃত্ত টানা হ'ল। হয়ে গেলে, আরও বড় মাপের দ্বিতীয় আর এক প্রস্থ বৃত্তচতুষ্টয় টানা হয়; ক্রোভা-চক্রে এইরকম বেশ কয়েকপ্রস্থ বৃত্ত আঁকা থাকে।

এবারে চক্রটিকে আর একটি চাকতির ওপর সমকেন্দ্রিক ক'রে বসানো হয়। চাক্তির সামনে একটি লম্বা চৌকো রন্ধ্র-কাটা বোর্ড রাখা থাকে; তার মধ্যে দিয়ে বৃত্তগুলির চাপের ছোট ছোট অংশ দেখতে পাওয়া যায় মাত্র। ছবিতে

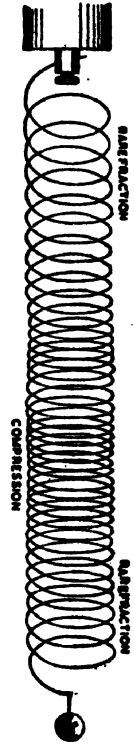
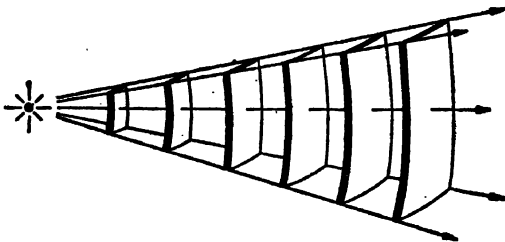
দেখা যাচ্ছে যে, একেবারে বাঁয়ের চাপগুলি কাছাকাছি আর ডানের দিকে তারা অপেক্ষাকৃত দূরে দূরে রয়েছে। তাদের যথাক্রমে সঙ্কুচিত ও প্রসারিত স্তরসমাবেশ ব'লে ধরা যায়। এবারে চাকতিটিকে ঘোরাতে সুরু করলে সংকোচন সরতে সুরু করবে, আর তার পেছনে প্রসারণ দেখা দেবে। চাকতিটি ঘুরিয়ে যেতে থাকলে সংকোচন ও প্রসারণ পরপর চলতে থাকবে।

5·8(b) চিত্রে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ দেখানোর এক বিকল্প ব্যবস্থা। স্প্রিং-এর নিচের প্রান্তে বলটি ওঠানামা করতে থাকলে সংকোচন ও প্রসারণ ক্রমান্বয়ে এক দিকেই চলতে দেখা যাবে।

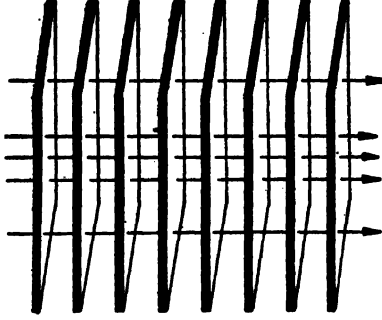
চিত্র 5.8(b)
অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ প্রদর্শক স্প্রিং

৫-৭. সমতলীয় সরল দোলজাতীয় তরঙ্গ :

বাস্তবক্ষেত্রে তরঙ্গমালা খুবই জটিল হতে পারে। উৎপাদী স্পন্দনের রীতি-প্রকৃতি সেজন্যে অনেকটা দায়ী। এছাড়াও প্রসারকালে তার রূপ বা গড়ন, সরণবিস্তার, দশাবেগ, তরঙ্গদৈর্ঘ্য সবই নিয়মিতভাবে বা হঠাৎ হঠাৎ পাল্‌টে যেতে পারে। তাত্ত্বিক আলোচনা তাই সরলতম তরঙ্গ দিয়ে সুরু করাই বাঞ্ছনীয়। সরলীকরণের প্রথম ধাপ সুষম পর্যাবৃত্ত তরঙ্গ, দ্বিতীয় ধাপ সরল দোলজাতীয় বা সাইন তরঙ্গ আর শেষ ধাপে সরলতম তরঙ্গ হয়ে দাঁড়ায় সরল দোলজাতীয় সমতলীয় তরঙ্গ।

সরল দোলন পর্যাবৃত্ত গতির সরলতম রূপ। জড় মাধ্যমে কোথাও

চিত্র 5.9(a)—অপসারী তরঙ্গমালা

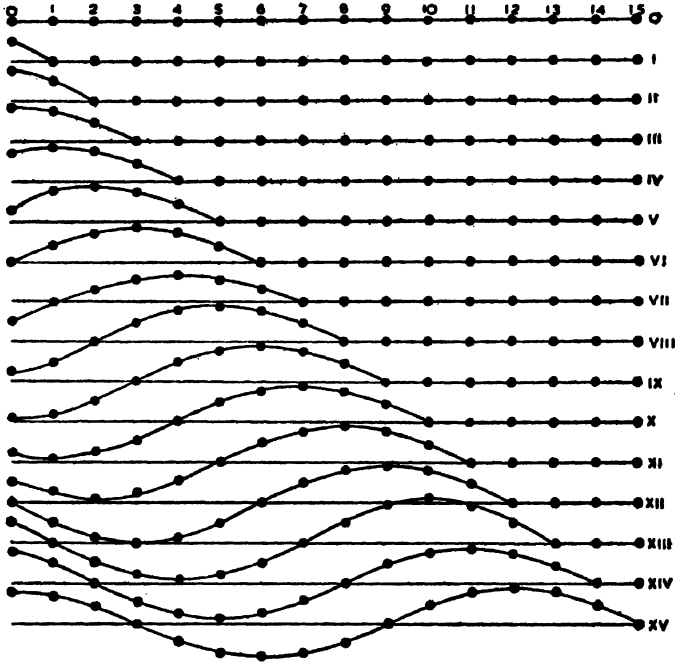
সরল দোলন হলে, সেই আলোড়ন গোলীয় তরঙ্গের আকারে [চিত্র 5.9(a)]

চারিদিকে ছড়িয়ে পড়বে (জলে ঢিল, পূজা-প্যাণ্ডালে মাইকের গান), কিন্তু সমতলীয় তরঙ্গ [চিত্র 5.9(b)] কেবল একদিকেই এগোবে (মনে কর, একটা বড় তক্তা খাড়া ক'রে ধ'রে তুমি এগোচ্ছ)। যেকোন শ্রেণীর সচল

চিত্র 5.9(b)—সমতলীয় তরঙ্গমালা

সমতলীয় তরঙ্গ কেবলমাত্র একদিকে নিজ অক্ষ বরাবর এগোয়, আদর্শক্ষেত্রে আশেপাশে একটুও ছড়ায় না, তার গড়ন বা রূপ, সরণবিস্তার, বেগ, দৈর্ঘ্য সবকিছুই অপরিবর্তিত থাকে। স্পষ্টতই সরল দোলজাতীয় সমতলীয় তরঙ্গ সরল দোলনের মতোই অবাস্তব কল্পনামাত্র।

ক. উৎপত্তি : লৈখিক পদ্ধতি : ধরা যাক, কোন জড় মাধ্যমে কোন এক রেখা বরাবর সমদূরত্বে স্পন্দক কণাগুলি রয়েছে [চিত্র 5.10(a)] এবং তাদের 0-চিহ্নিত কণাটি আড়াআড়ি দিকে স্বল্পবিস্তার সরল দোলনে স্পন্দিত হচ্ছে। তার পরের কণাটি স্বল্পকাল পরে স্পন্দন সুরু করবে। এই কালান্তরের কারণে কণা-দুটির মধ্যে স্পন্দনদশায় তফাৎ থাকবে। আন্দোলন পরপর কণায় সঞ্চারিত হতে থাকবে এবং যেকোন দুই ক্রমিক কণার মধ্যে সমান ও স্বল্পমান দশাভেদ থাকবে। তরঙ্গ প্রসারের পথে যেকোন দুই কণার মধ্যে দশাভেদ তাদের মধ্যে বিচ্ছেদের সমানুপাতিক।

স্পন্দনশীল প্রতিটি কণা পর্যায়কাল T পরপর স্পন্দন সম্পূর্ণ করে। 5.10 চিত্রে $T/12$ কালান্তরে বিভিন্ন কণার সরণ দেখানো হয়েছে। তাদের মধ্যে যেকোনটি, তার ঠিক আগেরটির $T/12$ সময় পরে আন্দোলন সুরু করেছে এবং স্পন্দন তথা তরঙ্গ, বাঁ থেকে ডাইনে সরছে, দেখানো হয়েছে।

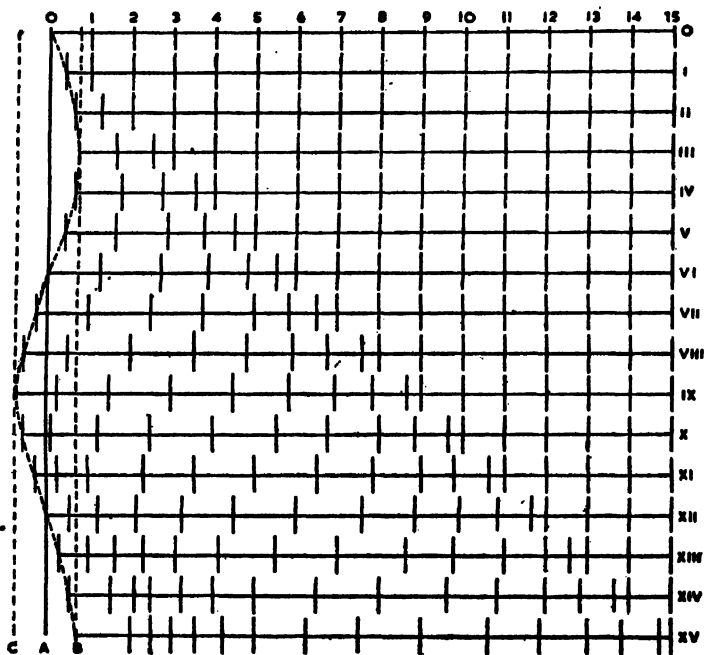
লক্ষ্য কর যে, 0 চিহ্নিত কণাটি যখন একবার দোলন শেষ ক'রে দ্বিতীয়বার দোলন সুরু করছে, 12 চিহ্নিত কণাটি তখন একই দিকে একই বেগে চলতে সুরু করছে। কাজেই এরা আপাতদৃষ্টিতে সমদশা হলেও তাদের মধ্যে আসলে 2π রেডিয়ান দশাভেদ রয়েছে ; এদের সরণ ও বেগের মান এবং

চিত্র 5.10(a)—অনুপ্রস্থ তরঙ্গের কণাসরণের পরম্পরা

দিক একই। সমদশায় স্পন্দমান দুই ক্রমিক কণার মধ্যে দূরত্বকে তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) বলে। এপর্যন্ত যা যা বলা হ'ল তা অনুপ্রস্থ [চিত্র 5.10(a)] এবং অনুদৈর্ঘ্য [চিত্র 5.10(b)] দুই তরঙ্গের বেলাতেই সমভাবে প্রযোজ্য। দ্বিতীয় ছবির বাঁয়ের বক্ররেখা অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের তরঙ্গরূপ। এখানে কণার বদলে স্তরের স্পন্দন দেখানো হয়েছে।

খ. ব্যঞ্জক সমীকরণ: ১-৬.১(ক) সমীকরণ অনুযায়ী চরম বিচলনের মুহূর্ত থেকে কাল গণনা সুরু করলে t সময় পরে কণার সরণ হয়

$$\xi = \xi_m \cos \omega t$$

তরঙ্গব্যাপ্তির পথে যেকোন দুই কণার মধ্যে স্পন্দনদশায় ভেদ থাকে। সুতরাং আদি কণা ($x=0$) থেকে $x=x$ দূরত্বে যে কণা, তার দশাবিলম্বের (phase lag) মান ε ধরা যাক; তাহলে সেই কণাটির স্পন্দনের সমীকরণ হবে

$$\xi_{x=x}=\xi_m \cos(\omega t-\varepsilon)$$

চিত্র 5.10(b)—অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে কণাসরণের পরম্পরা

এখন ওপরের আলোচনা অনুসারে দশাবিলম্ব ε, দুই কণার বিচ্ছেদের (x) সমানুপাতিক; আবার λ বিচ্ছেদে দুই কণা থাকলে তাদের মধ্যে দশাভেদ 2π রেডিয়ান; তাহলে $\varepsilon=(2\pi/\lambda)x$ এবং

$$\xi_x=\xi_m \cos\left(\omega t-\frac{2\pi}{\lambda}x\right)=\xi_m \cos\left(2\pi nt-\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$$

$$=\xi_m \cos\frac{2\pi}{\lambda}(n\lambda t-x)=\xi_m \cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x)$$

(৫-৭.১)

পক্ষান্তরে, স্পন্দনশীল কণা সাম্য অবস্থান অতিক্রম করার মুহূর্ত থেকে কাল গণনা সুরু করলে তার স্পন্দন সমীকরণ ১-৬.২(খ) অনুযায়ী হবে

$$\xi_x = \xi_m \sin(\omega t - \varepsilon) = \xi_m \sin\frac{2\pi}{\lambda}(ct - x) \qquad (৫\text{-}৭.২)$$

জটিল ব্যঞ্জনায় এই দুই সমীকরণকে একযোগে

$$\xi_x = \xi_m e^{j\beta(ct-x)} \ [\text{ এখানে } \beta = 2\pi/\lambda\ ] \qquad (৫\text{-}৭.৩)$$

আকারে লেখা যায়। আগের সমীকরণ-দুটি এর যথাক্রমে বাস্তব ও অলীক অংশ।

এরা বাঁ থেকে ডানদিকে অর্থাৎ পজিটিভ x-অক্ষ বরাবর আগুয়ান সরল দোলজাতীয় সমতলীয় তরঙ্গের গণিতীয় প্রতিরূপ। তরঙ্গ ডান থেকে বাঁয়ে এগোলে তার দশা $\beta(ct + x)$ আকার পেত।

উদাহরণ : (১) $y = 4\cos 2\pi\ (t/0{\cdot}02 - x/400)$ সমীকরণটি যে সচল তরঙ্গের প্রতিরূপ তা প্রতিষ্ঠা কর। x এবং y সেমি এবং t সেকেণ্ডে প্রকাশিত হয়ে থাকলে সরণবিস্তার, তরঙ্গদৈর্ঘ্য, তরঙ্গবেগ এবং কম্পাংক কত কত ?

সমাধান : $y = 4\cos 2\pi\left(\frac{t}{0{\cdot}02} - \frac{x}{400}\right)$

$$= 4\cos 2\pi\left(50t - \frac{x}{400}\right)$$

$$= 4\cos\frac{2\pi}{400}(20000t - x)$$

এই সমীকরণকে $y = a\cos(2\pi/\lambda)(ct - x)$ এর সঙ্গে তুলনা ক'রে পাচ্ছি

সরণবিস্তার $(a) = 4$ সেমি, তরঙ্গদৈর্ঘ্য $(\lambda) = 4$ মি.

তরঙ্গবেগ $(c) = 200$ মি/সে, কম্পাংক $n = \frac{c}{\lambda} = 50$

এবার $(t+1)$ মুহূর্তে $x + 20000$ সেমি দূরে সরণ হবে

$$y' = 4\cos\frac{2\pi}{400}[\,20000(t+1) - (x + 20000)]$$

$$= 4\cos\frac{2\pi}{400}(20000t - x) = y$$

অর্থাৎ প্রথম বিন্দু থেকে 200 মি দূরে এবং এক সেকেণ্ড পরে একই

সরণ হচ্ছে—দেশ ও কাল সাপেক্ষে সরণ আবৃত্ত হয়েছে। সুতরাং সমীকরণ সচল তরঙ্গ নির্দেশ করছে।

(২) এক সমতলীয় তরঙ্গের সরণবিস্তার 0·001 সেমি, কম্পাংক 200 হার্ৎজ., তরঙ্গদৈর্ঘ্য দেড় মিটার। তার গণিতীয় প্রতিরূপ কি? তার দশাবেগ এবং 30 সেমি তফাতে দুই বিন্দুতে দশাভেদ কত কত?

সমাধান : $y = a \cos \dfrac{2\pi}{\lambda}(ct - x) = a \cos\left(2\pi nt - \dfrac{2\pi}{\lambda}x\right)$

$$= 0{\cdot}001 \cos 2\pi\,(200t - x/150)$$

দশাবেগ $c = n\lambda = 200 \times 1.5 = 300$ মি/সে

দশাভেদ $= (2\pi/\lambda)(ct - x_1) - (2\pi/\lambda)(ct - x_2)$

$= (2\pi/\lambda)(x_2 - x_1)$

$= (2\pi/150) \times 30 = 0{\cdot}4\pi$ রেডিয়ান $= 72^\circ$

তরঙ্গবেগ এবং কণাবেগ : তরঙ্গদশা পজিটিভ x-অক্ষ বরাবর $c = (\partial x/\partial t)$ বেগে এগোয়। সেই তরঙ্গাঘাতে কণা ξ-দিকে বিচলিত হয়। সুতরাং তার বেগ $v = (\partial\xi/\partial t)$ দাঁড়ায়। এখন দশাবেগ (c) এবং কণাবেগের (v) মধ্যে সম্পর্ক বার করতে আমরা ৫-৭.২ সমীকরণকে t এবং x সাপেক্ষে অবকলন করবো। তাহলে

$$v = \dot{\xi}_x = c\beta\xi_m \cos \beta(ct - x) \qquad (৫\text{-}৭.৪)$$

এবং
$$\frac{\partial \xi_x}{\partial x} = -\beta\xi_m \cos\beta\,(ct - x) \qquad (৫\text{-}৭.৫)$$

এই দুটিকে তুলনা করলে দেখা যাচ্ছে

$$v = c.\left(-\frac{\partial\xi_x}{\partial x}\right) \qquad (৫\text{-}৭.৬)$$

৫-৭.১ সমীকরণ দিয়ে সুরু করলেও আমরা এই ফলেই পৌঁছব। 5.6 চিত্র দেখলে বোঝা যাবে যে $(\partial\xi_x/\partial x)$ রাশিটি $x = x$ বিন্দুতে সরণ-দেশান্তর বক্রের নতি (slope) মাত্র এবং যেকোন নিমেষে কণাবেগ এই বক্রের ঋণাত্মক নতির সমানুপাতিক।

তরঙ্গগতির অবকল সমীকরণ : ৫-৭.৪ এবং ৫-৭.৫ সমীকরণ-দুটিকে যথাক্রমে t এবং x এর সাপেক্ষে অবকলন করলে পাওয়া যাবে

$$\frac{\partial v}{\partial t}=\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}=-c^2\beta^2\ \xi_m \sin \beta(ct-x)$$

এবং $$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}=-\beta^2 \xi_m \sin \beta\ (ct-x)$$

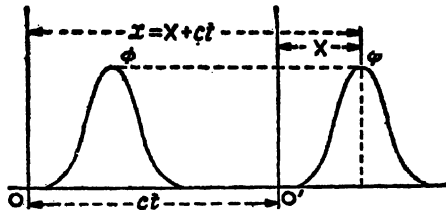
সুতরাং এদের তুলনা ক'রে পাওয়া যাবে

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}=c^2\ \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \qquad (৫\text{-}৭.৭)$$

৫.৯ অনুচ্ছেদে আমরা দেখব, যেকোন সুষম সমতলীয় সচল তরঙ্গ x-অক্ষ বরাবর চললে এটি তার অবকল সমীকরণ।

৫-৮. সচল সমতলীয় তরঙ্গের গাণিতীয় ব্যঞ্জক :

এবারে আলোচ্য—যেকোন সচল, সমতলীয় তরঙ্গ, যে শুধুই সরল দোলজাতীয় নয়। **যে তরঙ্গ কোনরকম প্রান্তিক সর্তাধীনে চলে না, তাকে সচল তরঙ্গ বলে।** সমতলীয় তরঙ্গ পাশের দিকে না ছড়িয়ে কেবল একটিমাত্র দিকে এগোয়। সেই দিকটিকে x-অক্ষ ধরা যাক।

মনে কর যে, ϕ মাধ্যমের এমন এক ধর্ম, যা তরঙ্গ চলার পথে ক্রমাগত বদ্‌লে যাচ্ছে। এই পরিবর্তী ধর্ম, মাধ্যমের ঘনত্ব বা চাপ কিম্বা কণার সরণ বা তার বেগ, যেকোনটিই হতে পারে। এই ϕ-কে **তরঙ্গ-প্রাচল** (wave parameter) বলে। যেহেতু আলোড়ন সচল, এই প্রাচল (ϕ), দেশ (x) এবং কালের (t) ওপরে নির্ভর করবে। যেকোন মুহূর্তকে আদি নিমেষ

চিত্র 5.11—তরঙ্গ-প্রতিকৃতির প্রসার

($t=0$) ধরলে ϕ কেবলমাত্র x-নির্ভর অর্থাৎ $\phi=f(x)$; $\phi=f(x)$-এর লেখচিত্রকে তরঙ্গের প্রতিকৃতি (wave profile) বলে। কারণ যদি O-কে মূলবিন্দু (চিত্র 5.11) ধ'রে x-এর সাপেক্ষে ϕ-এর পরিবর্তনের আলোকচিত্র

কোন মুহূর্তে নেওয়া হয়, তাহলে সময় t স্তব্ধ হয়ে যায় এবং $\phi=f(x)$ বক্রটি মেলে। প্রসারকালে তরঙ্গের গড়ন অপরিবর্তিত থাকলে যেকোন পরের মুহূর্তে $(t=t)$ আলোকচিত্র নিলে সেটি আগের সঙ্গে অভিন্ন ; কেবলমাত্র তরঙ্গ পজিটিভ দিকে $x+ct$ দূরত্বে (c এখানে ধ্রুবক) গিয়ে পৌঁছেছে। $x=ct$ অবস্থানে O' বিন্দুকে নতুন মূলবিন্দু এবং সেখান থেকে তরঙ্গের স্থানাংক X ধরলে তরঙ্গ-প্রতিকৃতির নতুন ব্যঞ্জক হবে $\phi=f(X)$; কিন্তু আদি মূলবিন্দু O সাপেক্ষে এই অবস্থানই $x=(X+ct)$ হয়। আমরা যদি ধ'রে নিই মূলবিন্দুও তরঙ্গের সঙ্গে চলছে তাহলে সম্পর্ক দাঁড়াবে

$$\phi_{(x,0)}=f(X)=f(x-ct)=\phi_{(x,t)} \qquad (৫\text{-}৮.১)$$

অর্থাৎ $\phi=f(x-ct)$ হবে, x-অক্ষ বরাবর বাঁ থেকে ডাইনে চলিষ্ণু, সুষম (constant) সচল তরঙ্গের সমীকরণ। যদি তরঙ্গ বিপরীতমুখে তথা নেগেটিভ x-দিকে চলে, তাহলে $\phi=f(x+ct)$ হবে। এখন যদি আদি নিমেষে $f(x)$ বক্রটি মূলবিন্দুর বাঁয়ে থেকে থাকে তাহলে $\phi=f(ct-x)$ লেখা যায়। এই দ্বিতীয় রূপে সমীকরণটি লেখার চলই বেশী। সরল দোলজাতীয় তরঙ্গে ফলন $(ct-x)$-এর একটি সুনির্দিষ্ট আকার $[\xi=\xi_m \cos\beta\,(ct-x)]$ দেখা গেছে।

অপেক্ষক $(ct-x)$ এর ধর্ম : (ক) অপেক্ষক বা ফলন $f(ct-x)$ মাধ্যমের যে ধর্ম নির্দেশ করে তার মান কেবলমাত্র একটি দেশ-স্থানাংক-নির্ভর। কাজেই ব্যাপ্তি অভিমুখের অর্থাৎ x-অক্ষের লম্বদিকে y-z তলের সর্বত্রই এই মান সমান। ফলে সমদশা-তলগুলি পরস্পর সমান্তরাল সমতল হবে। তাই তরঙ্গমুখগুলি সমতলীয়।

(খ) এই সমীকরণে যদি t-র মান 1 এবং x-এর মান c পরিমাণে বাড়ানো হয় তাহলে সমীকরণের মান দাঁড়াবে

$$\begin{aligned}\phi_{(t+1),(x+c)}&=f[c(t+1)-(x+c)]\\&=f(ct-x)=\phi_{(x,t)}\end{aligned} \qquad (৫\text{-}৮.২)$$

অর্থাৎ t নিমেষে যে আলোড়ন x স্থানাংকে রয়েছে, এক সেকেণ্ড পরে সে $(x+c)$ বিন্দুতে পৌঁছবে ; তাহলে ধ্রুবক c হচ্ছে এক সেকেণ্ডে আলোড়ন কর্তৃক অতিক্রান্ত দূরত্ব অর্থাৎ কিনা তার দশাবেগ।

(গ) এবারে আমরা তরঙ্গ **প্রাচলের সার্বিক রূপ** আলোচনা করবো।

যদি তরঙ্গমুখ x, y বা z কোন নির্দিষ্ট অক্ষ বরাবর না চ'লে যেকোন রেখা r বরাবর চলে তাহলে

$$\phi_{(x,y,z,t)} = f(ct - lx - my - nz) \qquad (৫\text{-}৮:৩)$$

রূপে তরঙ্গসমীকরণ লেখা হবে ; এখানে (x, y, z) ত্রিমাত্রিক স্থানাংক জ্যামিতির মতে কোন বিন্দু P-র স্থানাংক, $r^2 = (x^2 + y^2 + z^2)$, আর $(l^2 + m^2 + n^2) = 1$; সেখানে l, m, n রাশিগুলি, r-এর সঙ্গে x, y, z-এর যথাক্রমিক দিক্ কোসাইন নির্দেশ করে।

প্রতিটি (x, y, z) বিন্দুতে যদি ϕ-কে মানে অপরিবর্তিত থাকতে হয় তাহলে $(lx + my + nz)$ রাশিটিকে ধ্রুবক হতে হবে। আবার গণিতের মতে $(lx + my + nz) =$ ধ্রুবক হলে, ঐ রাশিটি একটি সমতলের গণিতীয় ব্যঞ্জক বা প্রতিরূপ। এই সমতলই তরঙ্গমুখ। এই তলের অভিলম্ব তথা রশ্মিগুলির x-, y-, z-অক্ষগুলির সাপেক্ষে দিক্-কোসাইনগুলি যথাক্রমে l, m, n হয়। যদি তরঙ্গমুখকে ঘুরিয়ে তার অভিলম্ব x-অক্ষ বরাবর ফেলা যায় তাহলে $l = 1$, $m = 0$, $n = 0$ হয় ; তখন $\phi = f(ct - x)$, পরিচিত তরঙ্গ সমীকরণ চলে আসে।

৫-৯. সমতলীয় সচল তরঙ্গের অবকল সমীকরণ :

ক. প্রতিষ্ঠা : আমরা $f(ct \pm x)$ অপেক্ষকটিকে সার্বিক (general) স্বৈচ্ছিক তরঙ্গ-ফলন (wave function) বলতে পারি। এটি থেকে আমরা এমন একটি অবকল সমীকরণে পৌঁছব, যেটি সচল তরঙ্গমাত্রেই মেনে চলে। আমরা প্রথমে একমাত্রিক তরঙ্গের ক্ষেত্রে (অর্থাৎ তার গতিমুখ কার্টেজীয় তন্ত্রের তিনটি নির্দিষ্ট অক্ষের যেকোন একটি, এখানে x-অক্ষ বরাবর) সেই সমীকরণ প্রতিষ্ঠা করবো।

আমাদের তরঙ্গ-প্রাচল ϕ এবং $f(ct - x)$ তরঙ্গ-ফলন। আমরা সুবিধার জন্য

$f'(z) = (d/dz).f(z)$ এবং $f''(z) = (d/dz).f'(z)$ লিখব। তাহলে

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -1 \quad \text{এবং} \quad \frac{\partial z}{\partial t} = c$$

$$\text{এবং} \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{d\phi}{dz} \cdot \frac{\partial z}{\partial x}^{*} = f'(z).(-1)$$

---

* $d\phi/dz$ দিয়ে আমরা z-এর সাপেক্ষে ϕ-এর পূর্ণ অবকলন এবং $\partial z/\partial x$ দিয়ে x-এর সাপেক্ষে z-এর আংশিক অবকলন বোঝাব।

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}=\frac{\partial}{\partial x}[-f'(z)]=\frac{d}{dz}[-f'(z)]\cdot\frac{\partial z}{\partial x}$$

$$=-f''(z).(-1)=f''(z)$$

অনুরূপে $\dfrac{\partial\phi}{\partial t}=\dfrac{d\phi}{dz}.\dfrac{\partial z}{\partial t}=f'(z).c$

এবং $\dfrac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=c.\ \dfrac{d}{dz}f'(z).\dfrac{\partial z}{\partial t}=c^2f''(z)$

$$\therefore\quad \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=c^2\ \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} \qquad (৫\text{-}৯.১)$$

$\phi=f\ (ct+x)$ ফলন নিয়ে এগোলে এই সমীকরণই মিলবে। লক্ষণীয় যে, ৫-৭.৭ সমীকরণও একই ব্যঞ্জক। তবে সেক্ষেত্রে তরঙ্গ বিশেষ শ্রেণীর ছিল কিন্তু এখানে তরঙ্গ সাধারণ শ্রেণীর। সুতরাং $(ct\pm x)$ রাশির যেকোন ফলনই অবকল সমীকরণটির সর্ত পূরণ করবে। ৫-৯.১ তরঙ্গগতির সরলতম অবকল সমীকরণ। অবশ্য একে সবক্ষেত্রে প্রয়োগ করাও যায় না—যেমন সরণবিস্তার বেশী (৭-২ অনুচ্ছেদ) হলে, তরঙ্গবিস্তার কমতে থাকলে (৬-১১ অনুচ্ছেদ) বা নমনজাত (flexural) তরঙ্গ (১৩-৬ অনুচ্ছেদ) উৎপন্ন হলে এই সমীকরণ অচল। তবুও তরঙ্গগতির বিশ্লেষণে এর গুরুত্ব যথেষ্ট বেশী।

খ. সমাধান ঃ ৫-৯.১ সমীকরণের সার্বিক সমাধান পেতে আমরা দ্যালাম্বাঁতের পন্থায় $u=(ct-x)$ এবং $v=(ct+x)$ ধরবো। তাহলে

$\dfrac{\partial\phi}{\partial x}=-\dfrac{\partial\phi}{\partial u}+\dfrac{\partial\phi}{\partial v}$ এবং $\dfrac{\partial^2\phi}{\partial x^2}=\dfrac{\partial^2\phi}{\partial u^2}-2\dfrac{\partial^2\phi}{\partial u.\partial v}+\dfrac{\partial^2\phi}{\partial v^2}$

আর $\dfrac{\partial\phi}{\partial t}=c\left(\dfrac{\partial\phi}{\partial u}+\dfrac{\partial\phi}{\partial v}\right)$

এবং $\dfrac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=c^2\left(\dfrac{\partial^2\phi}{\partial u^2}+2\dfrac{\partial^2\phi}{\partial u.\partial v}+\dfrac{\partial^2\phi}{\partial v^2}\right)$

এখন $\dfrac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=c^2\ \dfrac{\partial^2\phi}{\partial x^2}$ হতে হলে $\dfrac{\partial^2\phi}{\partial u.\partial v}=0$ হবে। তাহলে সর্বমান্য সমাধান হবে

$$\phi=A\ f_1(u)+Bf_2(v)=Af_1(ct-x)+Bf_2(ct+x) \qquad (৫\text{-}৯.২)$$

এখানে A এবং B দুই সমাকলন ধ্রুবক, f_1, f_2 দুই স্বেচ্ছিক কিন্তু ভিন্ন ভিন্ন ফলন। তাই ৫-৯.১ অবকল সমীকরণ, বিপরীতমুখী সমবেগ দুই সমতলীয় তরঙ্গ নির্দেশ করে। f_1 এবং f_2 আলাদা আলাদা ফলন হওয়ায় তরঙ্গের শ্রেণী আলাদাও হতে পারে।

সমতলীয় তরঙ্গের কোন রশ্মি যদি x-y তলের সমান্তরালে থাকে তাহলে তরঙ্গ-সমীকরণ দ্বিমাত্রা হবে। তখন

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=c^2\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}\right)$$

এবং $$\phi=A\,f_1(ct-lx-my)+B\,f_2\,(ct+lx+my)$$

আর রশ্মি যদি কোন তলের সঙ্গেই সমান্তরাল না হয় তাহলে তরঙ্গ-সমীকরণ ত্রিমাত্রা হবে। তখন

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}=c^2\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}\right)\equiv\nabla^2\phi$$

এবং $\phi=A\,f_1\,(ct-lx-my-nz)+B\,f_2(ct+lx+my+nz)$

গ. **প্রাচল-বিচার** ঃ আমরা ϕ-কে মাধ্যমের যেকোন পরিবর্তনের ধর্ম (যথা—কণাসরণ, কণাবেগ, চাপ, ঘনত্ব, আয়তন প্রভৃতি) ব'লে চিহ্নিত করেছি। এখন আমরা দেখব যে এরা প্রত্যেকেই ৫-৯.১ সমীকরণ মেনে চলে। আংশিক অবকলনের প্রক্রিয়াক্রম, বিনিমেয় (commutative) বলেই এটা সম্ভব। তার অর্থ এই যে, z যদি x এবং y দুই স্বাধীন চলকের ফলন হয়, তবে

$$\frac{\partial}{\partial x}\cdot\frac{\partial}{\partial y}(z)=\frac{\partial}{\partial y}\cdot\frac{\partial}{\partial x}(z)$$

অর্থাৎ, অবকলনের ফল ক্রম-নিরপেক্ষ।* উচ্চতর অবকলজদের (higher derivatives) বেলাতেও এই নিয়ম খাটে। সাধারণভাবে

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^m\left(\frac{\partial}{\partial y}\right)^n(z)=\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^n\left(\frac{\partial}{\partial y}\right)^m(z) \qquad (৫\text{-}৯.৩)$$

উদাহরণ হিসাবে ধরা যাক, তরঙ্গপ্রাচল (ϕ) কণার নিমেষসরণ (ξ) ;

* উষ্ণগতিতত্ত্বে (Thermodynamics) আংশিক অবকলনের এই ধর্মের বহু ব্যবহার আছে।

আমরা জানি কণাসরণ দেশ ও কাল দুই স্বাধীন চলকের ফলন

$$\xi = f(x, t) ;$$

$$\therefore \quad \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^m \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)^n (\xi) = \left(\frac{\partial}{\partial t}\right)^m \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^n (\xi) \qquad (৫\text{-}৯.৪)$$

এই সমীকরণ বলে দিচ্ছে $\partial\xi/\partial x$, $\partial^2\xi/\partial x^2 \cdots\cdots$, $\dot{\xi}$, $\ddot{\xi} \cdots$ এরা ξ-এর সঙ্গে একই সমীকরণ মানবে এবং একই দশাবেগে (c) ছড়িয়ে পড়বে।

(১) ধরা যাক, তরঙ্গ চলার দরুন মাধ্যমের যেকোন কণার যেকোন মুহূর্তে সরণ ξ এবং তার স্পন্দনবেগ $v = \dot{\xi}$; তাহলে

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right) = \frac{\partial}{\partial t}\left(c^2 \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\right) \text{ বা } \frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right) = c^2 \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2}(v) = c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}(v) \qquad (৫\text{-}৯.৫)$$

কাজেই কণার স্পন্দনবেগ তরঙ্গের অবকল সমীকরণ মেনে চলে। অনুরূপভাবেই দেখানো যায় যে, $\ddot{\xi} = \dfrac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \dfrac{\partial v}{\partial t}$ একইভাবে ৫-৯.৪ সমীকরণ মেনে চলে

অর্থাৎ
$$\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right) = c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right)$$

(২) সমতলীয় অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ চললে মাধ্যমে ঘনীভবন ও তনূভবনের উৎপত্তি হয়। ঘনীভবনে মাধ্যমের স্তরের আনুপাতিক **আয়তন-সংকোচন** (s) এবং তনূভবনে আনুপাতিক **আয়তন-বৃদ্ধি** $(\triangle)$ হয়। আয়তন-সংকোচনের ফলে স্তরের মধ্যে চাপবৃদ্ধি (p) হয় ; যদি মাধ্যমের আয়তন-বিকার গুণাংক (K) ধরা হয়, তাহলে $p = -Ks$ হবে। এইজাতীয় তরঙ্গে কণার সরণ ξ ঘটে x-অক্ষ বরাবর ; কাজেই $\triangle = \partial\xi/\partial x$ এবং $s = -\triangle = -\partial\xi/\partial x$ আসে।

যেহেতু $\xi = f(x, t)$ এবং সে অবকল সমীকরণ ৫-৯.১ মেনে চলে, সেইহেতু $\triangle$ রাশিটিও এই সমীকরণ মেনে চলবে। কেননা

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)(\xi) = \frac{\partial}{\partial x}\left[c^2 \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)(\xi)\right]$$

বা $$\frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)=c^2\cdot\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) \qquad (৫\text{-}৯.৬)$$

অতএব $$\frac{\partial^2 \triangle}{\partial t^2}=c^2\cdot\frac{\partial^2 \triangle}{\partial x^2}$$

অনুরূপেই $$\frac{\partial^2 s}{\partial t^2}=c^2\ \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \qquad [\because\ s=-\triangle]$$

এবং $$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=c^2\ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \qquad [\because\ p=-Ks]$$

তার মানে, শাব্দচাপ (p) এবং তজ্জনিত আয়তন-সংকোচন (s) তথা ঘনত্ব-বৃদ্ধি ($d\rho$) কিম্বা আনুপাতিক আয়তন-বৃদ্ধি বা আয়তনাংক ($\triangle$), সকলেই অবকল সমীকরণ (৫-৯.১) মেনে চলে।

তবে বিশেষভাবে মনে রাখা চাই যে **একমাত্রিক সচল সমতলীয় তরঙ্গে প্রাচলের পরিবর্তন স্বল্পমান হলেই এই সমীকরণ প্রযোজ্য।**

৫-১০. সমতলীয় দোলজাতীয় তরঙ্গ :

দোলজাতীয় তথা সমঞ্জস (harmonic) তরঙ্গ বলতে $\phi=f\ (ct\pm x)$ সমীকরণের এক বিশেষ রূপ $A\ {}^{\sin}_{\cos}\ \beta(ct\pm x)$ বোঝায়। এরা ছাড়াও উপরোক্ত ফলনের যেকোন ঘাতশ্রেণী, যেমন $B\ (ct\pm x)^n$ বা সূচক রাশি যেমন $Ce^{a(ct\pm x)}$ সকলেই সমতলীয় তরঙ্গ নির্দেশ করে। তরঙ্গের প্রকৃতি বুঝে যোগ্য রূপটি প্রয়োগ করতে হবে।

৫-৭ অনুচ্ছেদে এদের আলোচনা প্রসঙ্গে দেখা গেছে যে দোলজাতীয় তরঙ্গের সাধারণ রূপ $\xi_m e^{j\beta(ct\pm x)}$ এবং তার কোসাইন এবং সাইন অংশগুলি যথাক্রমে

$$\xi_{\text{cosine}}=\text{Re}\ \xi_m e^{\pm j\beta(ct\pm x)} \quad \text{এবং} \quad \xi_{\text{sine}}=\text{Im}\ \xi_m e^{\pm j\beta(ct\pm x)} \qquad (৫\text{-}১০.১)$$

অবকল সমীকরণ $\ddot{\xi}=c^2(\partial^2\xi/\partial x^2)$ সমাধান করতে দু'বার সমাকলন করতে হয়; ξ_m এবং β সেই দুই সমাকলন ধ্রুবক, তারা যথাক্রমে স্পন্দন-বিস্তার এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য-$(2\pi/\lambda)$ বা ব্যাপ্তি-(propagation) ধ্রুবক; একে আবার, কৌণিক-দেশীয় (spatial) কম্পাংকও বলে। স্পষ্টতই $1/\beta$ দূরত্বের মধ্যে 2π সংখ্যক তরঙ্গ থাকার কথা।

চলক-বিশ্লেষণ প্রণালী (Separation of Variables)**:** দোলজাতীয় তরঙ্গ-সমীকরণ প্রতিষ্ঠা করতে আমরা এক নতুন পন্থা কাজে লাগাব। তরঙ্গ-প্রাচল (ξ), দুটি পরস্পর নিরপেক্ষ চররাশি x এবং t-র ওপর নির্ভর করে। তাই ধরা যাক যে ξ, x-নির্ভর ফলন $X(x)$ এবং t-নির্ভর ফলন $T(t)$, এই দুই রাশির গুণফল অর্থাৎ

$$\xi_{(x,t)} = X(x).\ T(t)$$

$$\therefore\quad \frac{\partial\xi}{\partial x} = T\left(\frac{dX}{dx}\right) \text{ এবং } \left(\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\right) = T\left(\frac{d^2X}{dx^2}\right)$$

অনুরূপে $$\frac{\partial^2\xi}{\partial T^2} = X\left(\frac{d^2T}{dt^2}\right)$$

তরঙ্গ সমীকরণে এই মানগুলি বসালে

$$X\left(\frac{d^2T}{dt^2}\right) = c^2 \cdot T\left(\frac{d^2X}{dx^2}\right)$$

$$\text{বা}\quad \frac{d^2T}{dt^2}.\frac{1}{T} = c^2\ \frac{d^2X}{dx^2}.\frac{1}{X} \qquad (৫\text{-}১০.২)$$

সমীকরণের বাঁদিক x-নিরপেক্ষ, ডানদিক t-নিরপেক্ষ ; যেহেতু দুই-ই অখণ্ড অভেদ রাশি এবং পরস্পর নিরপেক্ষ অচর রাশি, তারা প্রত্যেকেই ধ্রুবক। এখন ξ-কে x এবং t সাপেক্ষে পর্যাবৃত্ত হতে হলে, ধ্রুবককে ঋণাত্মক হতে হবে।* এই ধ্রুবককে $-\omega^2$ বললে, পাচ্ছি

$$c^2\ \frac{d^2X}{dx^2}.\frac{1}{X} = -\omega^2 \text{ বা } \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2}X = 0 \qquad (৫\text{-}১০.৩)$$

$$X = A_1 e^{j\omega X/c} + B_1 e^{-j\omega X/c}$$

অনুরূপভাবেই $$\frac{d^2T}{dt^2}.\frac{1}{T} = -\omega^2 \text{ বা } \frac{d^2T}{dt^2} + \omega^2 T = 0$$

$$T = A_2 e^{j\omega T} + B_2 e^{-j\omega T}$$

এখন X এবং T গুণ করলে চারটি ধ্রুবক আসে ; অথচ অবকল সমীকরণ দ্বিতীয় ক্রমের হওয়ায় ধ্রুবক দুটি মাত্র হবে। যদি

---

* তা না হয়ে তারা যদি ধনাত্মক হ'ত, তাহলে সময়ের সঙ্গে হয় কেবলই বাড়তে থাকবে, নয়তো কেবলই কমবে, পর্যাবৃত্ত হবে না।

(ক) B_1 এবং B_2 শূন্য হয় তাহলে

$$\xi = X(x).T(t) = A_1 e^{j\omega x/c} A_2^{j\omega t} = Ae^{j(\omega x/c+\omega t)}$$
$$= Ae^{j(\omega t+\beta x)} = Ae^{j\beta(ct+x)} \qquad (৫\text{-}১০.৪ক)$$

(খ) A_1 এবং B_2 শূন্য হয় তবে

$$\xi = B_1 e^{-j\omega x/c} A_2^{j\omega t} = A' e^{j(\omega t-\beta x)} = A' e^{j\beta(ct-x)} \qquad (৫\text{-}১০.৪খ)$$

সমীকরণ দুটি ৫-১০.১-এর সঙ্গে তুলনীয়।

৫-১১. সচল সমতলীয় দোলজাতীয় অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে শক্তিবণ্টন :

সচল তরঙ্গের চলাকালে মাধ্যমের কোন কণার স্থায়ী সরণ হয় না বটে, কিন্তু শক্তির স্থানান্তর ঘটে। মাধ্যমের সর্বত্র শক্তির পরিমাণ সমান নয়, কোথাও কম, কোথাও বা বেশী ; তার রূপও এক নয়, কোথাও স্থিতীয়, কোথাও গতীয়, অধিকাংশ জায়গাতেই দুয়ের কমবেশী সমন্বয়। তরঙ্গের মধ্যে দোলজাতীয় তরঙ্গ সরলতম এবং শব্দতরঙ্গ অনুদৈর্ঘ্য বলেই আমরা সেইজাতীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রেই মাধ্যমে শক্তিবিন্যাস আলোচনা করবো।

তরঙ্গক্ষুব্ধ কণাগুলির বিচলনের শেষ প্রান্তে যে কেবল স্থিতিশক্তি, সাম্যবিন্দু অতিক্রমকালে কেবলমাত্র গতিশক্তি আর তার চলার পথে অন্য যেকোন বিন্দুতে দুই জাতীয় শক্তি কমবেশী থাকে, এ কথা সরল দোলনে শক্তি প্রসঙ্গে শিখেছি। ঘনীভবনের মাঝের স্তরে চাপ সবচেয়ে বেশী, তনুভবনের মধ্যস্তরে চাপ সবচেয়ে কম, দুটিই মাধ্যমের অস্বাভাবিক ও বিকৃত অবস্থা, তাই ঐ ঐ স্তরে স্থিতিশক্তি সর্বাধিক। পক্ষান্তরে, প্রান্তবিন্দুগুলিতে স্তরের ওপর চাপ স্বাভাবিক বায়ুমণ্ডলীয়, সুতরাং স্থিতিশক্তি মোটেই নেই, সবটাই গতিশক্তি।

গণনা : ধরা যাক, একক প্রস্থচ্ছেদবিশিষ্ট দীর্ঘ এক নল বরাবর অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ $+x$ অভিমুখে চলেছে। সেই তরঙ্গ সমতলীয় এবং সরল দোলজাতীয় হওয়ায়, কোন কণার

$$\text{নিমেষ সরণ} \quad \xi = \xi_m \sin\beta\,(ct-x)$$

$$\text{তার নিমেষ বেগ} \quad \dot{\xi} = \beta c \xi_m \cos\beta(ct-x)$$

মাধ্যমের স্বাভাবিক ঘনত্ব ρ_0 হলে, δx বেধের স্তরের ভর $\rho_0\delta x$ এবং গতিশক্তি

$$\delta E_k = \tfrac{1}{2}\rho_0\delta x.\ \dot{\xi}^2 = \tfrac{1}{2}\ \rho_0\delta x\ \beta^2\xi_m{}^2c^2\cos^2\beta(ct-x)$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho_0\delta x.\left(\frac{2\pi\xi_m c}{\lambda}\right)^2\cos^2\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x) \qquad (৫\text{-}১১.১)$$

তাহলে একক প্রস্থচ্ছেদের এবং λ দৈর্ঘ্যের মাধ্যমে সঞ্চিত গতিশক্তির মান হবে

$$\delta E_k = \int_0^\lambda \tfrac{1}{2}\rho_0\delta x.\ \frac{4\pi^2c^2\xi_m{}^2}{\lambda^2}\cos^2\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x)$$

$$= \frac{2\pi^2c^2\xi_m{}^2\rho_0}{\lambda^2}\int_0^\lambda \cos^2\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x).\delta x$$

$$= \frac{2\pi^2c^2\xi_m{}^2\rho_0}{\lambda^2}.\ \frac{\lambda}{2} \qquad (৫\text{-}১১.২)$$

অতএব মাধ্যমে গতিশক্তির গড় ঘনত্ব বা একক আয়তনে সঞ্চিত গড় শক্তি $\delta E_k/\lambda = \overline{E}_k$ পরিমাণ হবে।

$$\therefore \overline{E}_k = \frac{\pi^2c^2\xi_m{}^2\rho_0}{\lambda^2} = \rho_0\pi^2n^2\xi_m{}^2 = \frac{\rho_0}{4}\cdot\omega^2\xi_m{}^2 \qquad (৫\text{-}১১.৩)$$

তাহলে গড় গতিশক্তি সরণবিস্তার এবং কম্পাংকের বর্গের সমানুপাতে এবং কাজেই তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের বর্গের ব্যস্তানুপাতে বদলায়।

আবার মাধ্যমের δx দৈর্ঘ্যে সঞ্চিত স্থিতিশক্তির মান

δE_p = মাধ্যমের একক আয়তনকে সংকুচিত করতে প্রয়োজনীয় কার্য × δx দৈর্ঘ্যের স্তরের আয়তন

= ($\tfrac{1}{2}$ পীড়ন × বিকৃতি) × $(\delta x \times 1)$

$$= \left(\tfrac{1}{2}K\ \frac{\delta\xi}{\delta x}\times\frac{\delta\xi}{\delta x}\right)\times\delta x = \tfrac{1}{2}K\ \delta x\left(\frac{\delta\xi}{\delta x}\right)^2$$

$= \tfrac{1}{2}\ \rho_0c^2\ \delta x\left(\frac{\delta\xi}{\delta x}\right)^2$ [$\because\ c = \sqrt{K/\rho_0}$, (৬-৩.২) সমীকরণ]

$$= \tfrac{1}{2}\ c^2\rho_0\ \delta x\left[-\frac{2\pi}{\lambda}\xi_m\cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x)\right]^2$$

$$= \tfrac{1}{2}\ \rho_0\ \delta x\left(\frac{2\pi c\xi_m}{\lambda}\right)^2\cos^2\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x) \qquad (৫\text{-}১১.৪ক)$$

দেখা যাচ্ছে এই প্রতিরূপ, গতিশক্তির সমীকরণ ৫-১১.১ থেকে অভিন্ন। কাজেই ৫-১১.৩ অনুকরণে আমরা লিখতে পারি

$$\overline{E}_p = \rho_0 \omega^2 \xi_m{}^2/4 \qquad (৫\text{-}১১.৪খ)$$

তাহলে গড় শক্তি-ঘনত্ব $\overline{E} = \overline{E}_p + \overline{E}_k = \frac{1}{2}\rho_0 \omega^2 \xi_m{}^2 = 2\pi^2 n^2 \xi_m{}^2 \rho_0 c$

(৫-১১.৫)

লক্ষণীয় যে, গতিশক্তি ও স্থিতিশক্তি দেশ- (x) ও কাল (t)-সাপেক্ষ কিন্তু দুয়েরই নিজস্ব গড় এবং মোট গড় শক্তি দেশ- এবং কাল-নিরপেক্ষ।

৫-১২. সচল তরঙ্গের ধর্ম :

(১) তরঙ্গ শক্তি স্থানান্তরিত করে। সমদৈশিক ও সমসত্ত্ব মাধ্যমে এই স্থানান্তর সমবেগে এবং রশ্মি বরাবর ঘটে।

(২) ব্যাপ্তিপথে দুই ভিন্ন ঘনত্বের **বিস্তৃত** সীমাতলে, তরঙ্গ বাধা পেলে তার কিছু অংশ সমবেগে প্রথম মাধ্যমে ফিরে আসে (**প্রতিফলন**), কিছু অংশ ভিন্ন বেগে দ্বিতীয় মাধ্যমে ঢুকে পড়ে (**প্রতিসরণ**) আর সামান্য কিছু অংশের শোষণ হয়ে তাপের উদ্ভব হয়। সেজন্যে সীমাতলের দু'পাশে মাধ্যমের ঘনত্ব ও স্থিতিস্থাপকতা আলাদা হওয়া চাই। ৯ অধ্যায়ে আবার এদের বিস্তারিত আলোচনা হবে।

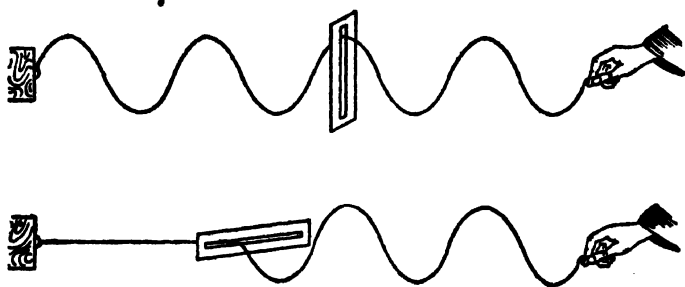
(৩) তরঙ্গব্যাপ্তির পথে তার দৈর্ঘ্যের সঙ্গে **তুলনীয়** মাপের বাধা বা ছিদ্র পড়লে বা বড় বাধার প্রান্তে পৌঁছলে, তরঙ্গমাত্রেই রশ্মিপথের আড়াআড়ি দিকে ছড়িয়ে যায় এবং জ্যামিতিক ছায়ার মধ্যে ঢুকে পড়ে। এই ঘটনার নাম **বিবর্তন** (diffraction)—এটি তরঙ্গের বিশিষ্ট ধর্ম।

আর তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাপেক্ষে পথের বাধা **ছোট** হলে, সে নতুন উৎসের ভূমিকা গ্রহণ করবে এবং তা থেকে তরঙ্গমালা গোলাকারে চারিদিকে ছড়িয়ে পড়বে। এই ঘটনাকে **বিক্ষেপণ** (scattering) বলে। ৯ অধ্যায়ে তরঙ্গের এই দুই আচরণ সম্বন্ধেও আলোচনা হবে।

(৪) মাধ্যমের কোন অংশে দুই বা ততোধিক তরঙ্গমালা একযোগে এসে পড়তে থাকলে সেই অংশের কোন কোন বিন্দুতে তারা বিপরীত দশায়, কোথাও কোথাও বা সমদশায় মিলবে। সেইসব জায়গায় স্পন্দনবিস্তার, একাকী কম্পনবিস্তারের তুলনায় কম বা বেশী হবে ; দুই তরঙ্গের সরণবিস্তার ও তরঙ্গদৈর্ঘ্য সমান হলে প্রথমোক্ত বিন্দুগুলি অনড় থাকবে। এই ঘটনাকে

তরঙ্গের **ব্যতিচার** (interference) বলে—এটি আর একটি বিশিষ্ট তরঙ্গলক্ষণ। তরঙ্গদৈর্ঘ্য সামান্য আলাদা হলে অনড় অবস্থাগুলি দশাবেগে তরঙ্গের অভিমুখে চলতে থাকে। এই ঘটনাকে **স্বরকম্প** (beats) বলে। এই ঘটনা শব্দতরঙ্গে সুপরিচিত। দুই ক্ষেত্রেই আবার কতকগুলি বিন্দুতে সরণবিস্তার একক বিস্তারের দ্বিগুণ হয়। এই অবস্থাগুলি ব্যতিচারে অচল, স্বরকম্পে তারা সচল। ১১ অধ্যায়ে এরা আলোচ্য। আবার সমবিস্তার, সমদৈর্ঘ্য দুই তরঙ্গমালা সমরেখ ও বিপরীতমুখী হলে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি হয়—পরের অনুচ্ছেদেই তারা আলোচ্য। প্রতিটি ঘটনাই **উপরিপাতন নীতি** শাসিত।

(৫) আমরা দেখেছি যে, তরঙ্গ মোটামুটি অনুপ্রস্থ এবং অনুদৈর্ঘ্য, এই দুই শ্রেণীর হয়। যে তরঙ্গধর্মগুলি আলোচিত হ'ল তারা দুই শ্রেণীতেই সমভাবে প্রকাশিত হয়। কিন্তু **সমবর্তন** বা **ধ্রুবণ** (polarisation) তাদের শ্রেণীভেদ নির্দেশ করে; অনুপ্রস্থ তরঙ্গের এই ধর্ম আছে, অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের নেই।

তরঙ্গ-অভিমুখের (যথা x-অক্ষের) দুই লম্বদিকে (y এবং z-অক্ষ বরাবর) স্পন্দনে সামঞ্জস্যের অভাবই ধ্রুবণ-ধর্ম।

চিত্র 5.12—সমবর্তন প্রদর্শন-ব্যবস্থা

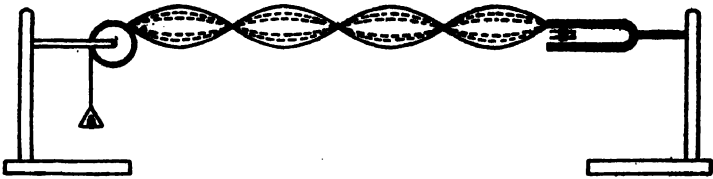
5.12 চিত্রে z-অক্ষ বরাবর বসানো চৌকো রন্ধ্রের মধ্যে দিয়ে একটা রবারের মোটা দড়ির এক প্রান্ত দেওয়ালে আটকানো, অপর প্রান্ত পর্যবেক্ষকের হাতে রয়েছে। হাত উঠিয়ে নামিয়ে অনুপ্রস্থ তরঙ্গ উৎপন্ন করলে তারা রন্ধ্রের মধ্য দিয়ে যাবে; কিন্তু রন্ধ্র অনুভূমিক y-অক্ষে থাকলে, যাবে না। ডাইনে বাঁয়ে হাত নাড়ালে উৎপন্ন তরঙ্গ তার মধ্যে দিয়ে যাবে, কিন্তু রন্ধ্র খাড়া থাকলে যাবে না। সুতরাং স্পন্দনের অভিমুখের ওপর অনুপ্রস্থ তরঙ্গের ব্যাপ্তি নির্ভর করে; বলতে পারি, অনুপ্রস্থ তরঙ্গের ব্যাপ্তিপথে স্পন্দনের দিক-সামঞ্জস্যের অভাব—সেটা

অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেলায় নেই, কেননা দাড়িটিকে ক্রমপর্যায়ে টান দিয়ে আর ঢিল দিয়ে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ সৃষ্টি করলে তা রন্ধ্রের দুই অবস্থানেই গ'লে চ'লে যাবে, আটকাবে না।

স্বন-তরঙ্গ অনুদৈর্ঘ্য ব'লে এই ধর্মের আর আলোচনা হবে না। কিন্তু আলো বা বেতার তরঙ্গের আলোচনায় এই ধর্ম বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ।

৫-১৩. স্থাণুতরঙ্গ :

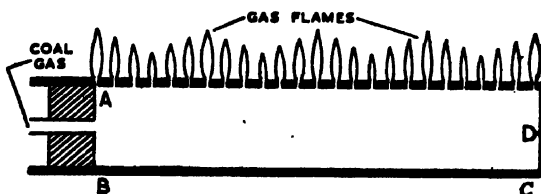
সীমিত মাধ্যমে তরঙ্গ চললে সে সীমাতলে প্রতিফলিত হয়। কোন দিকে আগুয়ান তরঙ্গমালার ওপর প্রতিফলিত তরঙ্গমালা উপযুক্ত সর্তাধীনে এসে পড়লে তাদের উপরিপাতনে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি হয়। তখন তরঙ্গগুলি যেন হঠাৎ থমকে দাঁড়িয়ে গেছে ব'লে বোধ হয়—তারা আর এগোয় না। সমদৈর্ঘ্যের দুই তরঙ্গমালা (বিস্তার সমান বা অসমান) মাধ্যমে একই রেখায় বিপরীতমুখে চললে, উপরিপাতনে এদের উৎপত্তি ঘটে। কম্পনশীল তার, রড, ঝিল্লী, পাত বা বায়ুস্তম্ভে, সর্বত্রই স্থাণুতরঙ্গের কারণেই সুরেলা শব্দ উৎপন্ন হয়।

অনুপ্রস্থ স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি-রীতি (মেল্‌ডির পরীক্ষা) : এখানে এক সটান তারের এক প্রান্ত একটি বিদ্যুচ্চালিত সুরশলার এক বাহুপ্রান্তে বাঁধা, আর তার অপর প্রান্ত (চিত্র 5.13) একটি পুলির ওপর

চিত্র 5.13—মেল্‌ডির পরীক্ষা

দিয়ে গিয়ে খুব হাল্কা এক তুলাপাত্রে বাঁধা। সুরশলাকার কম্পাংক কম (64Hz) এবং তার বাহুর ও তারের স্পন্দন খাড়াতলে হবে। তুলাপাত্রে ওজন চাপিয়ে সুতো টান করা হয়।

সুরশলাকার স্পন্দন সুরু হলে তারে অনুপ্রস্থ তরঙ্গ হতে থাকবে এবং তারা পুলি থেকে প্রতিফলিত হয়ে ফিরে এসে উপরিপাতন ঘটিয়ে স্থাণুতরঙ্গ সৃষ্টি করবে ; সেজন্যে অবশ্য সুতোর দৈর্ঘ্য এবং তুলাপাত্রে চাপানো ওজন

যথাযথ হতে হবে। এই দুই সর্ত নিয়ন্ত্রণ ক'রে সুতোটিকে ইচ্ছামতো লূপে ভাগ ক'রে কাঁপানো সম্ভব।

অনুদৈর্ঘ্য স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি-রীতি (রুবেন্সের পরীক্ষা) ঃ এখানে (চিত্র 5.14) BC কয়েক মিটার লম্বা, প্রায় 10 সেমি ব্যাসের

চিত্র 5.14—রুবেন্সের পরীক্ষা

একটি নল ; তার গায়ে সোজা এক লাইন ধ'রে এক ইঞ্চিমতো তফাতে তফাতে ছোট্ট ছোট্ট ফুটো করা থাকে। B প্রান্তে ছিপির মধ্যে দিয়ে গ্যাস ঢোকার লম্বা কাচ-নল। C প্রান্ত পাতলা পর্দা D দিয়ে বন্ধ। পর্দাটি সাধারণতঃ এক টেলিফোন-ঝিল্লী। B প্রান্তের ছিপিটিকে (A) এগিয়ে-পেছিয়ে নলের মধ্যে গ্যাসস্তম্ভের দৈর্ঘ্য কমানো-বাড়ানো যায়।

নলে দাহ্য গ্যাস ঢুকিয়ে জ্বালিয়ে দিলে প্রতিটি ফুটোয় একটি ক'রে শিখা জ্বলে। গ্যাস-চাপ নিয়ন্ত্রিত ক'রে শিখাগুলি 5 সেমি মতো দীর্ঘ করা হয়। এখন D যদি স্থির কম্পাংকে স্পন্দিত হয় তাহলে নলের গ্যাসে তরঙ্গদৈর্ঘ্য স্থিরমান হয়। এবারে ছিপি সরিয়ে সরিয়ে $AD = m\lambda/2$ (m যে-কোন অখণ্ড সংখ্যা) সর্ত পূরণ করতে পারলেই দেখা যাবে A এবং D দুই প্রান্তে শিখা দীর্ঘতম এবং তাদের থেকে $\lambda/2$ দূরে-দূরেও তাই। মধ্যবর্তী অংশে শিখাগুলির উচ্চতা কমতে কমতে খুব ছোট হয়ে আবার বাড়ে। $\lambda/2$ ব্যবধান যতগুলি প্রতিক্ষেত্রেই এই ঘটনা ঘটে ; অর্থাৎ নলের দৈর্ঘ্য বরাবর গ্যাসের চাপ নিয়মিত পর্যায়ক্রমে বাড়ে এবং কমে, কিন্তু কোন নির্দিষ্ট ফুটোতে সমানই থাকছে, সময়ের সঙ্গে বদলাচ্ছে না।

৫-১৪. সরল দোলজাতীয় স্থাণুতরঙ্গের তাত্ত্বিক আলোচনা ঃ

ওপরের দুই পরীক্ষায় দেখা গেল যে, দুইক্ষেত্রেই তরঙ্গরূপ তথা বিক্ষুব্ধ অবস্থা দেশসাপেক্ষে পর্যাবৃত্ত হচ্ছে, কিন্তু কালসাপেক্ষে নয়। তাই তরঙ্গরূপ স্থাণু,

সচল নয়। মনে রাখতে হবে যে, পর্যাবৃত্তি সচল তরঙ্গের পক্ষে অপরিহার্য নয় কিন্তু স্থাণুতরঙ্গের বেলায় অত্যাজ্য ধর্ম (কেন ?)। তাই আমাদের আলোচ্য হবে সরলতম পর্যাবৃত্ত তথা দোলজাতীয় তরঙ্গ—তারা সমদৈর্ঘ্য, সমান বা অসমান বিস্তার, x-অক্ষ বরাবর বিপরীতমুখী তরঙ্গমালা। বিস্তার বলতে সরণবিস্তার বা চাপবিস্তার বোঝাবে। সাধারণত অনুপ্রস্থ তরঙ্গে প্রথমটি আর অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে দ্বিতীয়টি বিবেচিত (পরীক্ষা-দুটি দেখ) হয় কিন্তু দুইই দুই শ্রেণীতেই প্রযোজ্য।

ক. **সমবিস্তার তরঙ্গ :** এখানে দুই তরঙ্গমালা অভিন্নদৈর্ঘ্য, অভিন্ন-বিস্তার, সমরেখ, বিপরীতমুখী ; তাদের একাকী ক্রিয়ায় কোন একটি মাধ্যমকণার কোন নিমেষে সরণ যথাক্রমে

$\xi_1 = \xi_m \cos(\omega t - \beta x)$ এবং $\xi_2 = \xi_m \cos(\omega t + \beta x)$
এবং সমবেত ক্রিয়ায় সরণ $\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2\xi_m \cos \omega t \,.\, \cos \beta x$

$$= A \cos \beta x \,.\, \cos \omega t \quad (৫\text{-}১৪.১)$$

তাহলে সমবেত দোলন সমস্পন্দনাংক (ω) বটে কিন্তু স্পন্দনবিস্তার ($A \cos \beta x$) আর স্থিরমান নয়, দেশ-সাপেক্ষে পর্যাবৃত্ত ভাবে বদলাচ্ছে ; আর দশা শুধু সময়-সাপেক্ষে (t) বদলাচ্ছে, সেখানে x বা দেশ-অংশটি নেই, তাই এটি স্থানীয় নিয়মিত স্পন্দন নির্দেশ করছে, সচল তরঙ্গ নয়।

স্পন্দনবিস্তার x-সাপেক্ষে পর্যাবৃত্ত ; তাই কোন কোন বিন্দুতে (5.15 চিত্রে N চিহ্নিত) সে শূন্য, আর কোন কোন বিন্দুতে (চিত্রে A চিহ্নিত) সে চরমমান ($2\xi_m$-এর সমান) হবে। প্রথম শ্রেণীকে সরণনিস্পন্দ আর দ্বিতীয় শ্রেণীকে সরণসুস্পন্দবিন্দু বলে। তাদের অবস্থান নির্দেশ করতে ৫-১৪.১ সমীকরণে

(১) প্রথমত $\cos \beta x = 0$ ধরতে হবে। তখন দাঁড়াবে

$$\beta x = \frac{2\pi}{\lambda} x = (2m+1)\,\frac{\pi}{2} \quad [\, m = 0, 1, 2, 3 \text{ ইত্যাদি} \,]$$

$$\therefore \quad x_N = (2m+1)\,\lambda/4 \qquad (৫\text{-}১৪.২)$$

অর্থাৎ, $x_0 = \lambda/4$, $x_1 = 3\lambda/4$, $x_2 = 5\lambda/4$ ইত্যাদি হবে। এরাই সরণনিস্পন্দ বিন্দুগুলির অবস্থান। স্পষ্টতই পরপর দুই নিস্পন্দবিন্দু $\lambda/2$ ব্যবধানে থাকছে।

(২) দ্বিতীয়ত $\cos \beta x = \pm 1$ ধরতে হবে। তখন হচ্ছে

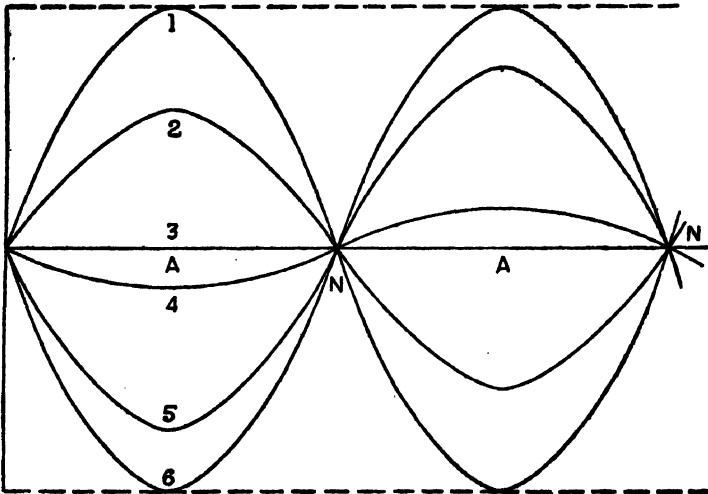
$$\beta x = \frac{2\pi}{\lambda} x = m\pi \text{ বা } x_A = 2m\, \lambda/4 \qquad (১৫\text{-}৪.৩)$$

[$m = 1, 2, 3, \cdots$ ইত্যাদি]

$$\therefore \quad x_1' = \lambda/2,\ x_2' = 2\lambda/2,\ x_3' = 3\lambda/2, \cdots \text{ ইত্যাদি}$$

এরা সুস্পন্দবিন্দুগুলির অবস্থান নির্দেশ করছে এবং তাদের মধ্যেও ব্যবধান $\lambda/2$; আঁকা থেকে সহজে ধারণা করা যায় ব'লেই 5.15 চিত্রে অনুপ্রস্থ তরঙ্গে তাদের দেখানো হয়েছে কিন্তু অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেলাতেও একই ব্যাপার হয়—মাধ্যমের প্রান্তসাপেক্ষে নিস্পন্দবিন্দুগুলি $\lambda/4$-এর অযুগ্ম গুণিতকের দৈর্ঘ্য পরে পরে আবৃত্ত হয় আর সুস্পন্দবিন্দুগুলি তার যুগ্ম গুণিতক দৈর্ঘ্য পরপর আবৃত্ত হয়। তাই কোন নিস্পন্দ আর পরের সুস্পন্দবিন্দুর মধ্যে ব্যবধান $\lambda/4$ থাকে।

চিত্র 5.15—সুস্পন্দ ও নিস্পন্দ বিন্দুগুলির অবস্থান

স্থাণু অনুপ্রস্থ তরঙ্গে পরপর দুই নিস্পন্দবিন্দুর মধ্যে দূরত্বকে 'loop' বলে ;

চিত্র 5.16—স্থাণুতরঙ্গে প্রতিকৃতির পর্যাবৃত্তি

পরপর দুটি লুপে স্পন্দনদশা বিপরীত—ছবিতে টানা ও ভাঙা রাশি টেনে দেখানো হয়েছে। সময় t বাড়ানোর সঙ্গে সঙ্গে $\cos \omega t$-র মান 0 থেকে

± 1-এর মধ্যে সম্ভবপর সব মানেই আবর্তিত হতে থাকে। 5.16 চিত্রে সময়ের সঙ্গে স্থাণুতরঙ্গের প্রতিকৃতির (wave profile) পর্যাবৃত্তির পর পর ছ'টি ধাপ দেখানো হয়েছে। যখন $\cos \omega t = 0$ তখন $\xi = 0$ এবং সেই মুহূর্তে কণাগুলি $NANAN$ রেখা বরাবর সাম্যাবস্থানে থাকে। প্রতি স্পন্দনে দু'বার ক'রে $\xi = 0$ হয়।

চলক-বিশ্লেষণ পদ্ধতিতে গণিতীয় সমাধান : তরঙ্গগতির অবকল সমীকরণ সমাধান ক'রে, যে বিপরীতমুখী একজোড়া সচল তরঙ্গ পাওয়া যায় তা ৫-৯.২ সমীকরণে আমরা দেখেছি। এদের উপরিপাতনেই স্থাণুতরঙ্গ হয়। চলক-বিশ্লেষণ পদ্ধতিতে সমাধান ক'রেও আমরা ৫-১৪.১ সমীকরণে পৌঁছতে পারি।

৫-১০ অনুচ্ছেদের আলোচনা অনুসরণ ক'রে আমরা লিখতে পারি

$$\frac{1}{T} \cdot \frac{d^2T}{dt^2} = \frac{c^2}{X} \cdot \frac{d^2X}{dx^2}$$

সমীকরণ চিহ্নের বাঁয়ের রাশি X-নিরপেক্ষ আর ডানের রাশি T-নিরপেক্ষ। দুই ধারেই অভেদ রাশি হওয়ায়, প্রত্যেকেই ধ্রুবরাশি। ধরা যাক, তার মান $-\omega^2$; তাহলে

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2}X = 0 \quad \therefore \quad X = A_1 e^{j\omega X/c} \qquad (৫\text{-}১৪.৪ক)$$

এবং $$\frac{d^2T}{dt^2} + \omega^2 T = 0 \quad \therefore \quad T = A_2 e^{j\omega T} \qquad (৫\text{-}১৪.৪খ)$$

(প্রতিটি সমাধানে একটি ক'রে ধ্রুবক থাকবে ; ৫-১০.৪ দেখ)

$$\therefore \quad \phi = \text{Re}\, X(x).T(t) = A_1 A_2 \cos \frac{\omega x}{c} \cdot \cos \omega t \qquad (৫\text{-}১৪.৫ক)$$

বা $$\phi = \text{Im}\, X(x).T(t) = A_1 A_2 \sin \frac{\omega x}{c} \cdot \sin \omega t \qquad (৫\text{-}১৪.৫খ)$$

ধ্রুবরাশি $-\omega^2$-কে বিশ্লেষধ্রুবক বলে। x এবং t চলরাশি-দুটিকে আলাদা ক'রে সমীকরণ চিহ্নের দু'দিকে বসানো গেছে ব'লেই এর অবতারণা সম্ভব হয়েছে। আরও লক্ষণীয় যে, বিশ্লেষধ্রুবক (separation constant) ঋণাত্মক ব'লেই দোলজাতীয় সমাধান এসেছে, নচেৎ

$$X = A_1 e^{\pm\omega X/c}, \quad T = A_2 e^{\pm\omega T} \text{ এবং } \phi = A_1 A_1^{\pm\left(\frac{\omega X}{c} + \omega T\right)}$$

সমাধান আসতো। সূচকে j না-থাকা পর্যাবৃত্তির অভাব সূচিত করে।

স্থাণুতরঙ্গে চাপবণ্টন বিচার : শব্দ তথা অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে কণার পর্যাবৃত্ত সরণের ফলে শাব্দ তথা বাড়তি চাপ (p) মূলবিন্দু থেকে দূরত্বের সঙ্গে পর্যায়ক্রমে বাড়ে কমে ; সচল ও স্থাণু দুই তরঙ্গেই তা হয়। সংজ্ঞানুসারে এই চাপপ্রসূত আয়তনবিকারাংক

$$K = \frac{p}{-\delta v/v} = \frac{p}{-(\delta\xi/\delta x)}$$

[এখানে ξ = সরণ এবং বিচারাধীন মাধ্যমের ক্ষেত্রফল = 1]

$$\therefore \quad p_1 = -K\frac{\partial\xi}{\partial x} = -K\frac{\partial}{\partial x}[\xi_m \cos(\omega t - \beta x)]$$

$$= -K\xi_m\beta \sin(\omega t - \beta x) \qquad (৫\text{-}১৪.৬ক)$$

এবং $$p_2 = -K\frac{\partial\xi}{\partial x} = -K\frac{\partial}{\partial x}[\xi_m \cos(\omega t + \beta x)]$$

$$= +K\xi_m\beta \sin(\omega t + \beta x) \qquad (৫\text{-}১৪.৬খ)$$

এরা যথাক্রমে $+x$ এবং $-x$ বরাবর চাপ-তরঙ্গ নির্দেশ করে। কাজেই কোন বিন্দুতে মোট শাব্দ চাপ

$$p = K\beta\,\xi_m[\sin(\omega t + \beta x) - \sin(\omega t - \beta x)]$$

$$= K\beta\,\xi_m.2\cos\omega t.\sin\beta x$$

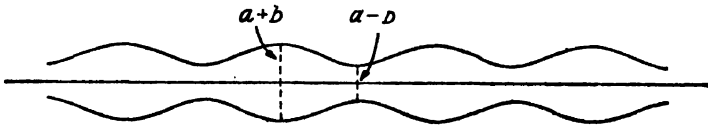
$$= 2K\beta\,\xi_m \sin\beta x.\cos\omega t = 2p_m \sin\beta x.\cos\omega t \qquad (৫\text{-}১৪.৭)$$

এখন ধনাত্মক ও ঋণাত্মক দুই অভিমুখেই তরঙ্গের চাপবিস্তার $p_m = K\beta\,\xi_m$; কাজেই স্থাণুতরঙ্গে চাপবিস্তার $2p_m \sin \beta x$, কণার অবস্থান (x)-নির্ভর এবং পর্যাবৃত্ত রাশি। যে যে বিন্দুতে $\sin\beta x = 0$, সেখানে সেখানে p_m শূন্য—তারা চাপনিস্পন্দবিন্দু (এখানে বায়ুচাপ স্বাভাবিক মানের)। আবার ৫-১৪.২ সমীকরণ বলছে যে, সরণনিস্পন্দবিন্দুগুলিতে $\cos\beta x = 0$; অর্থাৎ যেখানে $\sin\beta x$ শূন্য সেখানেই $\cos\beta x = \pm 1$; অর্থাৎ শাব্দচাপবিস্তার চরম হলে সরণবিস্তার শূন্য এবং বিপরীতক্রমে। তাইই হওয়ার কথা, কারণ চাপ বাড়ালে কণার যদি সরে যাওয়ার জায়গা থাকে তাহলে চাপ তো বাড়তেই পারে না।

আগে বর্ণিত রুবেন্সের পরীক্ষাতে আমরা এই সিদ্ধান্তেরই সমর্থন পাই। সেখানে নলের দুই প্রান্তই বন্ধ, বায়ুকণাগুলির সরে যাওয়ার জায়গা বিশেষ নেই,

সুতরাং তারা সরণ-নিষ্পন্দ বিন্দু ; কিন্তু সেখানে গ্যাসশিখা দীর্ঘতম অর্থাৎ শাব্দচাপ চরমমান। তা থেকেই বলা যায় যে, যেখানে যেখানে গ্যাসশিখা দীর্ঘতম সেই সেই বিন্দুগুলিতে স্থাণু ঘনীভবন রয়েছে—সরণ-নিষ্পন্দ এবং চাপ সুস্পন্দবিন্দু। আর যেখানে শিখাগুলি ছোট্ট, সেখানে স্থাণু-তনুভবন—চাপনিষ্পন্দ (স্বাভাবিক চাপ) আর সরণসুস্পন্দ (কণার সরণের স্বাধীনতা) বিন্দুগুলি রয়েছে।

স্পন্দনশীল তারে আর বায়ুস্তম্ভের বদ্ধপ্রান্তে মাধ্যমের যথাক্রমে সরণ এবং সংকোচনের পূর্ণ প্রতিফলনে যে তরঙ্গ হয় তারা আপতিত তরঙ্গের **সমবিস্তার** হয়।

খ. অসমবিস্তার স্থাণুতরঙ্গ ঃ আবার বায়ুস্তম্ভের খোলা মুখে সংকোচন-তরঙ্গের প্রতিফলন পূর্ণ হয় না, সুতরাং সেখানে প্রতিফলিত তরঙ্গের বিস্তার কম হয়। এক্ষেত্রে স্থাণুতরঙ্গ অসমবিস্তার। সাধারণভাবে বলা যায় যে, কোন মাধ্যমের নমনীয় সীমাতলে সমতলীয় তরঙ্গের লম্ব আপতনে প্রতিফলিত তরঙ্গের বিস্তার আপতিত তরঙ্গের চেয়ে কম হয়। তাদের উপরিপাতনে উৎপন্ন স্থাণুতরঙ্গের নিষ্পন্দবিন্দুগুলিতে (চিত্র 5.17) অল্প পরিমাণে স্পন্দন ঘটে।

চিত্র 5.17—অসমবিস্তার স্থাণুতরঙ্গ

ধরা যাক, আপতিত তরঙ্গের দরুন কোন বিন্দুতে নিমেষ-সরণ

$$\xi_1 = a\cos(\omega t - \beta x)$$

আর প্রতিফলিত তরঙ্গের দরুন সেই বিন্দুতে নিমেষ-সরণ

$$\xi_2 = b\cos(\omega t + \beta x)$$

সমাপতিত তরঙ্গের দরুন সরণ

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = a\cos(\omega t - \beta x) + b\cos(\omega t + \beta x)$$
$$= (a+b)\cos\beta x.\cos\omega t + (a-b)\sin\beta x.\sin\omega t$$

(৫-১৪.৮)

তার মানে, এখানে আমরা দু'প্রস্থ স্থাণুতরঙ্গ পাচ্ছি তাদের সরণবিস্তার আলাদা, যথাক্রমে $(a+b)\cos\beta x$ এবং $(a-b)\sin\beta x$, তাদের মধ্যে $T/4$ দশান্তর, একটির বিস্তার যখন চরম $(a\pm b)$, অন্যটির তখন শূন্য। তখন

(ক) $x=\pm m\lambda/2$ নির্দেশিত বিন্দুগুলিতে $\cos\beta x$ চরম মান, মোট সরণবিস্তার $(a+b)$; এই এই বিন্দুগুলিতে দ্বিতীয় স্থাণুস্পন্দনের বিস্তার শূন্য।

(খ) $x=(m+\frac{1}{2})\lambda$ নির্দেশিত বিন্দুগুলিতে $\sin\beta x=\pm 1$ (চরম মান), মোট সরণবিস্তার $(a-b)$; এই এই বিন্দুগুলিতে প্রথম স্থাণুস্পন্দনের মান শূন্য।

তাহলে লব্ধি-স্পন্দনে আমরা পর্যায়ক্রমে এমন এমন স্পন্দনতল পাচ্ছি যেখানে যেখানে স্পন্দনবিস্তার $(a+b)$ এবং $(a-b)$; তাদের অনুপাতকে স্থাণুতরঙ্গ অনুপাত (SWR) বলে। সমতলীয় তরঙ্গে সর্বাধিক কণাবেগের মান $\dot{\xi}_{max}=c\beta\xi_m$ এবং সর্বাধিক শাব্দচাপ $K\,(\partial\xi/\partial x)_{max}=K\beta\xi_m$; আমরা দেখছি—দুইই, কণার সরণবিস্তারের সমানুপাতিক।

$$\therefore\quad SWR=\frac{\xi_{max}}{\xi_{min}}=\frac{p_{max}}{p_{min}}=\frac{v_{max}}{v_{min}}=\frac{a+b}{a-b}=\frac{1+b/a}{1-b/a}$$

$$=\frac{1+r}{1-r}\qquad (৫\text{-}১৪.৯)$$

এখানে $r(=b/a)$ চাপপ্রতিফলন-গুণাংক—প্রতিফলিত ও আপতিত তরঙ্গের চাপবিস্তারের অনুপাত। শাব্দতীব্রতা, চাপবিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক এবং শাব্দক্ষমতার সমান। সুতরাং চাপক্ষমতা-প্রতিফলনাংক

$$\alpha_r=r^2=\frac{b^2}{a^2}=\left(\frac{SWR-1}{SWR+1}\right)^2\qquad (৫\text{-}১৪.১০)$$

খোলা মুখ অর্গান নলের তরঙ্গ নির্গমমুখে (১৪.৩খ) চাপতরঙ্গের অসম-বিস্তার প্রতিফলন হয়, কারণ তরঙ্গবাহিত শক্তির বেশ খানিকটাই বেরিয়ে যায়।

৫-১৫. সরল দোলজাতীয় স্থাণুতরঙ্গে শক্তিবণ্টন :

বিষমমুখী দুই অভিন্ন তরঙ্গমালার উপরিপাতনে সমবিস্তার স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি। তাই তার প্রতি তরঙ্গদৈর্ঘ্যে সঞ্চিত শক্তি সচল তরঙ্গদৈর্ঘ্যে সঞ্চিত শক্তির দ্বিগুণ। স্বভাবতই সরণনিস্পন্দ বিন্দুর মধ্যে দিয়ে শক্তি স্থানান্তর

না হওয়ারই কথা। তবে বাস্তব ক্ষেত্রমাত্রেই সামান্য পরিমাণ শক্তি যাবই, না গেলে স্পন্দন স্থায়ী হ'ত না ; কাজেই সরণীনিস্পন্দ বিন্দু একেবারে নিশ্চল থাকতে পারে না। সনোমিটারে (চিত্র 12.5) তারের স্পন্দন আলোচনায় এ প্রসঙ্গ আসবে।

৫-১১.৫ সমীকরণ বলে যে, সচল তরঙ্গে শক্তির অর্ধেক স্থিতীয়, অর্ধেক গতীয়। স্থাণুতরঙ্গের প্রতিটি বিন্দুতে এবং নির্দিষ্ট নিমেষে তাদের অনুপাত সমান কিন্তু এই শক্তি-অনুপাত প্রতি মুহূর্তেই বদলায়। স্থাণুতরঙ্গের একটি লুপে প্রতিটি কণার স্পন্দন সমদশা ; কাজেই তারা সবাই যখন একযোগে মধ্যক অবস্থান অতিক্রম করে, তখন শক্তির সবটাই গতীয়, আর তারা যখন সবাই স্পন্দনপ্রান্তে তখন সবটাই স্থিতীয়। আবার নিস্পন্দবিন্দুতে গতিশক্তি নেই, সুস্পন্দবিন্দুতে সবটাই গতিশক্তি।

গণনা : ৫-১৪.১ সমীকরণ থেকে স্থাণুতরঙ্গে যেকোন নিমেষে একটি কণার স্পন্দন

$$\xi = 2\xi_m \cos \beta x . \cos \omega t \qquad (৫\text{-}১৫.১)$$

সুতরাং তার বেগ $\dot{\xi} = -2\xi_m \omega \cos \beta x . \sin \omega t$ (৫-১৫.২)

৫-১১ অনুচ্ছেদের গণনাপদ্ধতি অনুসারে δx বেধের স্তরে সঞ্চিত গতিশক্তি

$$\delta E_k = \tfrac{1}{2}\rho_0 \delta x . \dot{\xi}^2 = \tfrac{1}{2}\rho_0 \delta x . 4\xi_m^2 \omega^2 \cos^2 \beta x . \sin^2 \omega t \qquad (৫\text{-}১৫.৩)$$

তাহলে এক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের স্তরে সঞ্চিত গতিশক্তির গড় মান হবে

$$\overline{\delta E_k} = \rho_0 \xi_m^2 \omega^2 \sin^2 \omega t \int_0^\lambda 2 \cos^2 \beta x . dx$$

$$= \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 \sin^2 \omega t \int_0^\lambda (1 + \cos 2\beta x)\, dx$$

$$= \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 \sin \omega t \left[\int_0^\lambda dx + \int_0^\lambda \cos 2\beta x . dx \right]$$

$$= \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 \sin^2 \omega t . \lambda \qquad (৫\text{-}১৫.৪)$$

কাজেই একক আয়তনে সঞ্চিত গতিশক্তির গড় মান তথা **গতিশক্তি-ঘনত্ব**

$$\overline{E_k} = \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 \sin^2 \omega t \qquad (৫\text{-}১৫.৫)$$

আবার গতিশক্তির চরম মানই মোট গড় শক্তি। সুতরাং

$$\overline{E} = \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 \qquad (৫\text{-}১৫.৬)$$

তাহলে স্থিতিশক্তির গড় ঘনত্ব

$$\overline{E}_p = \overline{E} - \overline{E}_k = \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 (1 - \sin^2 \omega t) = \rho_0 \omega^2 \xi_m^2 \cos^2 \omega t \qquad (৫\text{-}১৫.৭)$$

কাজেই ৫-১৫.৫ এবং ৫-১৫.৭ অনুসারে স্থাণুতরঙ্গে গতি- বা স্থিতি-শক্তির বণ্টন দেশ-নিরপেক্ষ কিন্তু কাল-নির্ভর, সময়ের সঙ্গে বদলায়। কিন্তু তাদের অনুপাত ($= \tan^2 \omega t$) যেকোন নির্দিষ্ট মুহূর্তে কণার অবস্থান নির্বিশেষে সমান।

৫-১৫.২ সমীকরণ থেকে স্থাণুতরঙ্গে কোন কণার নিমেষবেগ

$$v = \dot{\xi} = -2\, \xi_m \omega \cos \beta x \sin \omega t$$

এবং ৫-১৪.৭ থেকে শাব্দচাপ $p = 2p_m \sin \beta x . \cos \omega t$

এখন dt সময়ে একক ক্ষেত্রের মধ্য দিয়ে স্থানান্তরিত শক্তি বা

কৃত কার্য = প্রযুক্ত বল × দূরত্ব = বল × বেগ × সময় = $p \times \dot{\xi} \times dt$

∴ এক পর্যায়কালে স্থানান্তরিত শক্তির মান,

$$W = E_p = \int_0^T p .\ \dot{\xi} . dt$$

$$= \int_0^T 2p_m \sin \beta x .\ \cos \omega t .\ 2\ \xi_m \omega \cos \beta x .\ \sin \omega t\ dt$$

$$= p_m \xi_m \sin 2\beta x . \int_0^T \sin 2\omega t . dt = 0$$ [∵ সমাকলন মান শূন্য]

অর্থাৎ আদর্শ স্থাণুস্পন্দনে কোন প্রস্থচ্ছেদের মধ্য দিয়ে শক্তির স্থানান্তর হয় না। (এই অনুচ্ছেদের প্রথম 'প্যারা' দেখ।)

প্রশ্নমালা

১। আলোচনা কর—সচল তরঙ্গ এমন এক ভৌত রাশি যা কাল ও দেশ দুয়ের সাপেক্ষেই আবৃত্ত হয়। যদি t এবং x যথাক্রমে কাল ও দেশ স্থানাংক হয়, তাহলে দেখাও যে $(ct \pm x)$ দুটি রাশিরই যেকোন ফলন সচল সমতলীয় তরঙ্গ নির্দেশ করে। প্রমাণ কর যে, ধ্রুবসংখ্যা c এখানে তরঙ্গবেগ।

২। মাধ্যমে জড়তা ও স্থিতিস্থাপকতা সংহত থাকলে স্পন্দন হয় এবং বণ্টিত থাকলে তরঙ্গের উৎপত্তি হয় ; আলোচনা কর।

তরঙ্গরূপ, তরঙ্গবেগ, তরঙ্গমুখ কাকে কাকে বলে ? সচল সমতলীয় সুষম তরঙ্গ কাকে বলে ? বাস্তবে এইজাতীয় তরঙ্গ কি সম্ভব ? এইরকম তরঙ্গের গাণিতীয় প্রতিরূপ প্রতিষ্ঠা কর। দেখাও যে, এতে তরঙ্গগতির তিনটি বৈশিষ্ট্যই প্রতিফলিত।

তরঙ্গের অবকল সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর। তার সাধারণ সমাধান থেকে কি কি তথ্য মেলে ?

৩। সরল দোলজাতীয় সচল তরঙ্গের গাণিতীয় প্রতিরূপ প্রতিষ্ঠা কি-ভাবে করা যায় ? সচল তরঙ্গের সমীকরণের সঙ্গে এর তুলনা কর।

$\xi = a \sin\ (\omega t - \beta x)$ তরঙ্গ সমীকরণে বিভিন্ন রাশিগুলিকে যথাযথভাবে চিহ্নিত কর ; এই সমীকরণ থেকে তরঙ্গের অবকল সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর।

এই সমীকরণে তরঙ্গগতির বৈশিষ্ট্যগুলি যে প্রতিফলিত তা কি-ভাবে দেখাবে ?

৪। সমতলীয় সচল তরঙ্গের ক্রিয়ায় মাধ্যমের প্রতিটি কণার বিচলন

$$\xi = 5 \times 10^{-6} \cos\ (800t + \phi)$$

এবং তরঙ্গবেগ 340 মি/সে হলে, (*i*) কণার সরণবিস্তার, (*ii*) তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং (*iii*) 17 সেমি তফাতে দুই কণার মধ্যে দশাভেদ কত কত ?

[5×10^{-6} সেমি ; 85 সেমি ; 72°]

৫। 1000 চক্র/সে স্পন্দমান তরঙ্গের বেগ 330 মি/সে হলে, তরঙ্গের অভিমুখে 11 সেমি তফাতে দুই কণার মধ্যে দশাভেদ কত ? [120°]

x-অক্ষ বরাবর সচল তরঙ্গের সরণবিস্তার 2 সেমি, কম্পাংক 75 চক্র এবং বেগ 45 মি/সে হলে এবং $x = 135$ সেমি বিন্দুতে $t = 3$ সে সময়ে কণার সরণ, বেগ এবং ত্বরণ কত কত ? [-2 সেমি, 0 ; 440 মি/সে^{2}]

৬। অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে কণাবেগ, সংকোচন এবং শাব্দচাপ কাকে কাকে বলে ? দেখাও যে এই ভৌত রাশিগুলিও তরঙ্গগতির অবকল সমীকরণ মেনে চলে। এই মেনে চলা কি সর্তে কার্যকর হয় ?

চলক বিশ্লেষণ পন্থায় সরল দোলজাতীয় তরঙ্গের সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর। কণাবেগ ও দশাবেগ দুয়ের মধ্যে সম্পর্ক কি? তরঙ্গগতির বিশিষ্ট ধর্মগুলি সম্পর্কে সংক্ষিপ্ত আলোচনা কর।

কোন সমতলীয় তরঙ্গের স্পন্দনবিস্তার 0.001 সেমি, কম্পাংক 200/সে এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য 150 সেমি হলে, তার দশাবেগ এবং ব্যাপ্তিমুখে 30 সেমি তফাতে দশাভেদ কত কত? [300 মি/সে ; 72°]

৭। স্থাণুতরঙ্গ কাকে বলে? দুই সরল দোলজাতীয় তরঙ্গের উপরিপাতনে তাদের উৎপত্তি বিচার কর। স্থাণুতরঙ্গের ক্ষেত্রে উপরিপাতিত তরঙ্গ-দুটি পর্যাবৃত্ত হতেই হবে—কেন? নিষ্পন্দ ও সুস্পন্দবিন্দু কাকে বলে। নিষ্পন্দবিন্দু বাস্তব নয় কেন? প্রমাণ কর যে চাপসুস্পন্দ ও সরণ-নিষ্পন্দবিন্দুর একই অবস্থান হয়। স্থাণুতরঙ্গ অনুপাত কাকে বলে? এর ব্যবহারিক উপযোগিতা কি?

৮। সচল ও স্থাণুতরঙ্গের মধ্যে তুলনামূলক আলোচনা কর। দুই-প্রকার তরঙ্গের শক্তিবণ্টন আলোচনা কর।

৯। $y=A(ct-x)$ বা $A(ct+x)^2$ বা $A(ct-x)^3$ বা $A\log(ct+x)$ ফলনগুলি তরঙ্গগতিতে সুবিধাজনক নয়। কেন?

১০। তরঙ্গ শক্তি স্থানান্তরিত করে। সে কি ভরবেগ (রৈখিক বা কৌণিক) স্থানান্তরিত করতে পারে? দোলন কি তরঙ্গ?

১১। বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় তরঙ্গমাত্রেই 3×10^8 মি/সে বেগে চলে। আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্য 4×10^{-7} মি (বেগুনী) থেকে 7×10^{-7} মি (লাল) পর্যন্ত; X-রশ্মির বেলায় 5×10^{-9} মি থেকে 10^{-11} মি পর্যন্ত। এদের কম্পাংক-পাল্লা কত কত? বেতার-তরঙ্গের কম্পাংক-পাল্লা 1.5 মেগাহাৎ´জ্ থেকে দূর-দর্শনে 300 মেগাহাৎ´জ্ পর্যন্ত হয়—তরঙ্গদৈর্ঘ্যের পাল্লা কত?

[উঃ 75×10^{13} হাৎ´জ্—43×10^{13} হাৎ´জ্ ; 6.0 থেকে 3000×10^{16} হাৎ´জ্ 200 মি থেকে 1 মি পর্যন্ত]

১২। একটি সুষম তারের রিং v_0 স্পর্শকীয় বেগে দক্ষিণাবর্তে ঘুরছে। দেখাও যে তাতে চলমান তরঙ্গবেগ রিং-এর ব্যাস এবং তারের রৈখিক-ঘনত্ব-নিরপেক্ষ।

৬

সমতলীয় স্বন-তরঙ্গের ব্যাপ্তি

(Propagation of Plane Sound Waves)

৬-১. স্বন-তরঙ্গ :

শব্দ এক বিশেষ ধরনের স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ। সে অনুদৈর্ঘ্য শ্রেণীতে পড়ে, সুতরাং কঠিন, তরল, বায়বীয় সবরকম মাধ্যমের মধ্যে দিয়েই ছড়িয়ে পড়তে পারে। তার বেগ ভিন্নজাতীয় মাধ্যমে ভিন্ন, কিন্তু সুনির্দিষ্ট। বেগের মান মাধ্যমের স্থিতিস্থাপকগুণাংক এবং ঘনত্ব-নির্ভর। আমরা এই অধ্যায়ে **সমতলীয়** শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তি আলোচনা করবো।

স্বনকের স্পন্দনসংখ্যা মোটামুটি সেকেণ্ডে 20 থেকে 20 কিলোহার্ৎজ্-এর মধ্যে থাকলে এবং স্পন্দনের যান্ত্রিক শক্তির কিছুটা মাধ্যম-সংবাহিত হয়ে কানে পৌঁছলে শব্দের অনুভূতি হয়। **শব্দশক্তি মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে তরঙ্গের আকারে ব্যাপ্ত হয়।** এই সিদ্ধান্তের কারণগুলি নিচে দেওয়া গেল :—

(১) **শব্দের ব্যাপ্তির জন্য বাস্তব মাধ্যম দরকার কিন্তু মাধ্যমের কোন অংশের স্থায়ী স্থানচ্যুতি হয় না।** জ্যোতির্বিজ্ঞানীরা দূরবীন দিয়ে সূর্যে প্রচণ্ড বিস্ফোরণ ঘটতে দেখেছেন কিন্তু তা শুনতে পাননি, কারণ সূর্য ও পৃথিবীর মধ্যে বাস্তব মাধ্যম নেই। আবার, শব্দব্যাপ্তির ফলে বাতাস বয় না, কঠিন দণ্ডে শব্দ চললে সে নড়ে না, জলে স্রোতের সৃষ্টি হয় না।

যেকোন তরঙ্গের ব্যাপ্তিকালে বাস্তব মাধ্যমের আচরণ এইরকমই।

(২) পরিচিত তরঙ্গের মতোই **মাধ্যমভেদে শব্দের গতি ভিন্ন** হয়। এই বেগ কঠিন, তরল ও বায়বীয় মাধ্যমে ক্রমান্বয়ে কমে।

(৩) দুই মাধ্যমের বিভেদতল থেকে তরঙ্গের মতো শব্দও **প্রতিফলিত** হয়। প্রতিধ্বনি এবং অনুরণনের ঘটনা (৯-৩ এবং ১৯-২ অনুচ্ছেদ) এই তরঙ্গধর্মের সাক্ষী।

(৪) মাধ্যমের কোন অংশে ঘনত্বের স্থানীয় পরিবর্তন ঘটলে বা এক মাধ্যম থেকে অন্য মাধ্যমে শব্দ ঢুকলে, আর এক তরঙ্গধর্ম, **প্রতিসরণের** প্রকাশ

(৯-৯ অনুচ্ছেদ) হতে দেখা যায়। সমুদ্রে বা বায়ুমণ্ডলে (ক) জলস্রোত বা বাতাসের দরুন এবং (খ) উষ্ণতাভেদে বিভিন্ন ঘনত্বের স্তরের উৎপত্তি হয়; এবং পরীক্ষায় দেখা যায় যে, সেই সেই স্তরে শব্দের প্রতিসরণ হয়। প্রচণ্ড বিস্ফোরণকে কেন্দ্র ক'রে পর্যায়ক্রমে শব্দ ও নীরবতা মণ্ডলের উৎপত্তি হতে দেখা গেছে; এর কারণ শব্দ-তরঙ্গের বায়ুর উর্ধ্বস্তর থেকে **পূর্ণ প্রতিফলন** (চিত্র 9.22)—হিমমরীচিকার সদৃশ ঘটনা।

(৫) তরঙ্গের এক বিশিষ্ট ধর্ম **বিবর্তন**—তার দরুন তরঙ্গ পথের বাধাকে পাশ কাটিয়ে এগোতে পারে। শব্দের ক্ষেত্রে এই ধর্ম বিশেষভাবে পরিস্ফুট (৯-৮ অনুচ্ছেদ)। যে স্বনক চোখে দেখছি না, আড়ালে আছে, তার শব্দ শুনতে কোনই অসুবিধা হয় না।

(৬) তরঙ্গের অপর ধর্ম **ব্যতিচার**—দুই বা ততোধিক তরঙ্গমালার উপরিপাতনে বিক্ষুব্ধ মাধ্যমের স্থানবিশেষ, শান্ত থাকতে পারে। দুই জলতরঙ্গ মিলে শান্ত জলতল বা দুই আলোকতরঙ্গ মিলে যেমন অন্ধকার ঘটাতে পারে তেমনই উপযুক্ত সর্তাধীনে একাধিক শব্দতরঙ্গ মিলে নীরবতা (১১-২ অনুচ্ছেদ) ঘটাতে পারে।

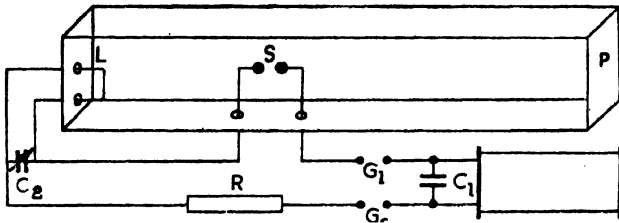
শব্দতরঙ্গ যে অনুদৈর্ঘ্য শ্রেণীর, তার প্রমাণ—

(১) প্রবাহী মাধ্যমে কেবলমাত্র অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গই চলতে পারে (৫-৩ অনুচ্ছেদ)। শব্দ যেহেতু বায়ু ও জলে চলে, তার প্রকৃতি অনুদৈর্ঘ্য হবেই।

(২) অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের মতোই শব্দতরঙ্গে ধ্রুবণ (৫-১২ অনুচ্ছেদ) ধর্ম অনুপস্থিত।

(৩) শব্দতরঙ্গে পর্যানুক্রমিক ঘনীভূত ও তনুভূত স্তরের আলোকচিত্র তোলা সম্ভব হয়েছে। এটাই শব্দের অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গধর্মের চূড়ান্ত প্রমাণ।

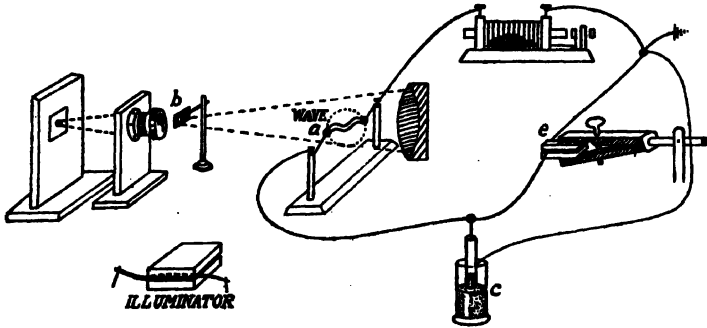
শব্দতরঙ্গের আলোকচিত্র গ্রহণ: এই কাজে প্রায়োগিক (technical) অসুবিধা মুখ্যত দুটি—তরঙ্গগতির ক্ষিপ্রতা আর তরঙ্গবাহী মাধ্যমের স্বচ্ছতা। তাদের লঙ্ঘন করা সম্ভব হয়েছে, (ক) শব্দতরঙ্গকে ক্ষণিকের জন্য আলোকিত ক'রে, আর (খ) ঘনীভূত স্তরে, বর্ধিত প্রতিসরাংকের ফলে পরিবর্তিত স্বচ্ছতাকে কাজে লাগিয়ে। ড্যোরাক এবং ট্যোপলার শব্দতরঙ্গের আলোকচিত্র গ্রহণের দু'রকম পথ উদ্ভাবন করেছেন। তাদের নাম যথাক্রমে ছায়াপদ্ধতি এবং Schlieren পদ্ধতি। আমরা খুব সংক্ষেপে তাদের আলোচনা করবো—

(ক) Dvorak's Shadow method : 6.1 চিত্রে যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। একটি আবেশ-কুণ্ডলীর (induction coil) সাহায্যে বড় একটি বৈদ্যুতিক ধারকে (C_1) এক লক্ষ ভোল্টের মতো বিভবভেদ সৃষ্টি করা হয়। এর বর্তনীতে G_1, G_2, L এবং S চারটি ফাঁক (gap) আছে। G_1 G_2 জুড়ে দিলে প্রচণ্ড বিদ্যুৎস্ফুলিঙ্গ ফাঁক L ও S ডিঙিয়ে যায়। L-এর সমান্তরালে C_2 একটি ধারক; তার ক্রিয়ায় G_1 G_2-তে প্রবাহের কারণে L ফাঁকে স্ফুলিঙ্গ সৃষ্টি হয়, কিন্তু S-এর খানিক পরে। কালক্ষেপের পরিমাণ C_2-এর ধারকত্বের উপর নির্ভর করে।

চিত্র 6.1—শব্দতরঙ্গের আলোকচিত্রগ্রহণ (Davies)

এই পদ্ধতিতে ছবি তোলার মূল নীতি হচ্ছে—জানা কালভেদে দুটি প্রবল বিদ্যুৎক্ষরণ ঘটানো; প্রথমটির প্রধান কাজ শব্দতরঙ্গের উৎপত্তি ঘটানো (S) আর দ্বিতীয়টির কাজ আলোকচিত্র-গ্রহণোপযোগী জোরালো আলো (L) জ্বালানো। প্রচণ্ড ঘাতশব্দে বায়ুস্তর অতিমাত্রায় সংকুচিত হওয়ায় সেখানে প্রতিসরাংক বেড়ে যায়, ফলে স্বচ্ছতা একটু কমে যায়। সেই স্তরের মধ্যে দিয়ে আলো গেলে আলোকচিত্রগ্রাহী প্লেটে (P) আবছা একটা ছায়া পড়ে।

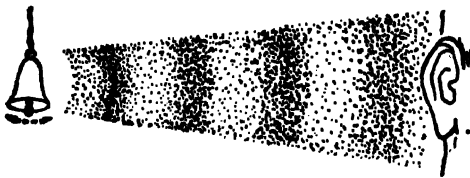
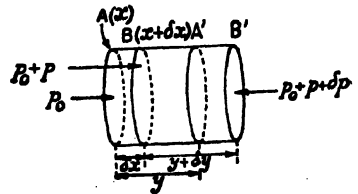
এখন G_1 G_2 জুড়ে দিলেই S রন্ধ্রে সশব্দে প্রচণ্ড বিদ্যুৎক্ষরণ হয়; উৎপন্ন শব্দঘাতজ গোলীয় তরঙ্গ ছড়াতে সুরু করে। C_2 দ্বারা নিয়ন্ত্রিত অবসরের পরে L রন্ধ্রের ম্যাগনেসিয়াম তারের দুই তড়িৎদ্বারের মধ্যে অত্যুজ্জ্বল বিদ্যুৎক্ষরণ হয়। এই আলোয় P প্লেটের ওপর S-ফাঁকে উদ্ভূত গোলীয় তরঙ্গের ছায়া পড়ে। R একটি তরলের পরিবর্তনীয়-রোধক এবং C_2-র ধারকত্বও বদলানো যায়। এদের সহায়তায় L এবং S-এর মধ্যে বিদ্যুৎক্ষরণের কালক্ষেপ বাড়ানো যায়। তাই ক'রে ক'রে শব্দঘাতের ব্যাপ্তির পর পর ছবি প্রায় নিরন্তর (continuous) ভাবেই তোলা যায়।

এই পরীক্ষণ-প্রণালী আদি ড্যোরাক পদ্ধতির উন্নততর সংস্করণ—উদ্ভাবন ডেভিসের।

(খ) Töepler's Schlieren method : এখানে উডের পরীক্ষণ-প্রণালী বর্ণনা করা হবে। 6.2 চিত্রে যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। একটি ত্রুটিমুক্ত, বিস্তৃত উন্মেষের লেন্‌স্‌-সমবায় একটি পর্দার ওপর একধারে বিদ্যুৎ-ক্ষরণের প্রতিবিম্ব ফেলে। বিদ্যুৎক্ষরণের উৎস e ; একই বর্তনীতে আর-একটি ক্ষরণ-রন্ধ্র a,—এখানে ক্ষরণ হয়ে শব্দের উৎপত্তি হয়। e-র সমান্তরালে c এক লিডেন-ধারক, যথোপযুক্ত কালক্ষেপ ঘটায়। শব্দতরঙ্গের অনুপস্থিতিতে বিদ্যুৎক্ষরণের প্রতিবিম্ব পর্দার নিচের দিকে পড়ে। সুতরাং পর্দার মাঝখানে ফোকাস-করা দূরবীনে কিছু দেখা যায় না। কিন্তু a ফাঁকে শব্দতরঙ্গ থাকলে

চিত্র 6.2—শব্দতরঙ্গের আলোকচিত্রগ্রহণ (Wood)

সেখানে ঘনীভূত স্তরে e-তে ক্ষরণের প্রতিবিম্ব প্রতিসৃত হয়ে পর্দার মাঝে উঠে আসে এবং দূরবীনের অন্ধকার দৃষ্টিপটে উজ্জ্বল আলোকরেখার মতো ফুটে ওঠে। দূরবীনের বদলে ক্যামেরা থাকলে, এটাই আলোক-চিত্রিত হয়ে যায়।

৬-২. শব্দতরঙ্গে চাপ-বণ্টন :

কোন স্বনক স্পন্দিত হতে থাকলে আশেপাশের মাধ্যমে পর্যায়ক্রমে ঘনী- এবং তনু-ভবনের সৃষ্টি হতে থাকে এবং মাধ্যমের ঘনত্বের এই বিক্ষুব্ধ অবস্থা

চিত্র 6.3—শব্দতরঙ্গের ব্যাপন

চিত্র 6.4—অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে চাপের বণ্টন

তার স্থিতিস্থাপকতাধর্মের দরুন চারিদিকে ছড়িয়ে পড়ে। 6.3 চিত্রে শব্দের অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গরূপের ব্যাপন (propagation) দেখানো হয়েছে।

ছবিতে দেখা যাচ্ছে যে, তরঙ্গের ব্যাপ্তিকালে বায়ুর কিছু কিছু অংশে স্তর ঘনীভূত, অন্যত্র তনুভূত হয়েছে। ঘনীভবনে ঘনত্ব স্বাভাবিকের তুলনায় বেশী, তনুভবনে তুলনায় কম। সেই কারণেই ঘনীভবনে চাপ স্বাভাবিকের চেয়ে বেশী, তনুভবনে কম। কাজেই শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তিকে মাধ্যমে ঘনত্ব বা চাপের বিক্ষুব্ধ অবস্থার প্রসারও বলতে পারি। প্রসঙ্গত বলা যায় যে, বিক্ষুব্ধ ও স্বাভাবিক চাপের অন্তরকেই **শাব্দ-চাপ** বলে।

মাধ্যমে সমতলীয় সরল দোলজাতীয় অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ চলাকালে ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় চাপের বণ্টন কিরকম হবে তা গণিতের সাহায্যে বার করা যায়। ধরা যাক, বায়ু-ভর্তি একক প্রস্থচ্ছেদের একটা সোজা নলের মধ্যে দিয়ে শব্দতরঙ্গ (চিত্র 6.4) এগোচ্ছে। নলের মধ্যে δx তফাতে দুই সরল ছেদ A আর B ; সংকোচন ও প্রসারণের ফলে t মুহূর্তে A ছেদ ξ (ছবিতে y) পরিমাণ স'রে A' এবং B ছেদ $\xi+\delta\xi$ (ছবিতে $y+\delta y$) স'রে B' অবস্থানে পৌঁছেছে ; তাহলে

$$BB'=\xi+\delta\xi=\xi+\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)\delta x$$ [একক তফাতে সরণ $=\partial\xi/\partial x=$ দেশ-সাপেক্ষে সরণ-পরিবর্তনের হার]

[মনে রাখা দরকার, সরণ ξ, দুই রাশি x (অবস্থান) এবং কাল (t) দুইই-নির্ভর ; এখানে এক নির্দিষ্ট মুহূর্তের ছবি ধরা হয়েছে ব'লে x-এর আংশিক অবকলন নেওয়া হয়েছে।]

A এবং B-র সরণের ফলে তাদের মধ্যবর্তী বায়ুর আয়তন এবং চাপ দুইই পাল্টেছে। প্রাথমিক আয়তন ছিল δx, পাল্টে সেটা দাঁড়িয়েছে $\delta x + (\partial\xi/\partial x)\delta x$; কাজেই আয়তন-পরিবর্তন $(\partial\xi/\partial x)\delta x$ এবং একক আয়তনে আয়তন-হ্রাস তথা বিকৃতি $=(-\partial\xi/\partial x)$ হবে। এই বিকৃতির ফলে উৎপন্ন চাপ (p) শাব্দ-চাপ বা বাড়তি চাপের সমান। বায়ুর আয়তন-বিকার-গুণাংক K হলে, হুকের সূত্রানুযায়ী

$$K=\frac{p}{-\partial\xi/\partial x} \text{ অর্থাৎ } p=K.(-\partial\xi/\partial x)=Ks \quad [\, s=\text{সংকোচন}\,] \tag{৬-২.১}$$

এখন সরল দোলজাতীয় তরঙ্গে x বিন্দুতে t সময়ে উৎপন্ন সরণ

$$\xi=\xi_m\cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x) \quad \therefore \quad \frac{\partial\xi}{\partial x}=\xi_m\frac{2\pi}{\lambda}\sin\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x)$$

$$\therefore \quad p = Ks = -\frac{2\pi K\xi_m}{\lambda}\sin\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x)$$

$$= \frac{2\pi K\xi_m}{\lambda}\cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x+\pi/2) \qquad (৬\text{-}২.২)$$

অর্থাৎ শাব্দ-চাপ (p), সরণ (ξ)-সাপেক্ষে সিকি পর্যায়কাল ($T/4$) বা এক পাদ ($\pi/2$) আগে ঘটে। কাজেই চরম শাব্দ-চাপের ($p_m = 2\pi K\xi_m/\lambda$) জায়গাতে সরণ শূন্য [Rubens-এর পরীক্ষা (5.14) দেখ] হয় এবং তা ঘটে ঘনীভূত স্তরের ঠিক মাঝখানে। p_m-কে চাপবিস্তার বলে। তাহলে

$$p = p_m \sin(2\pi/\lambda).(ct-x) \qquad (৬\text{-}২.৩)$$

আবার যেহেতু শব্দের বেগ ৬-৩.২ অনুযায়ী $c^2 = K/\rho_0$ অর্থাৎ $K = c^2\rho_0$

$$\text{চাপবিস্তার } p_m = \frac{2\pi}{\lambda}K\xi_m = \frac{2\pi c^2\rho_0}{c/n}.\xi_m = 2\pi nc\rho_0\xi_m$$

$$= \omega c\rho_0\xi_m \qquad (৬\text{-}২.৪)$$

৬-৩. প্রবাহী মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেগ :

প্রবাহী অর্থাৎ তরল বা গ্যাসীয় মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য বা শব্দতরঙ্গের বেগ মাধ্যমের আয়তন-বিকার-গুণাংক (K) এবং অবিক্ষুব্ধ অবস্থায় ঘনত্ব (ρ_0) —এই দুয়ের ওপর নির্ভর করে। এরা যথাক্রমে, মাধ্যমের স্থিতিস্থাপকতা ও জাড্য, এই দুই ধর্মের প্রতিভূ।

এক্ষেত্রে সমগ্র ঘটনাটি 6.4 ছবিতেই বিবৃত। ধরা যাক, $t=0$ মুহূর্তে কোন স্থৈর-মূলবিন্দু থেকে নলের A এবং B ছেদ-দুইটির দূরত্ব যথাক্রমে x এবং $(x+\delta x)$; δt অবসর পরে তরঙ্গের ক্রিয়ায় A এবং B স'রে যথাক্রমে A' ও B' অবস্থানে পৌঁছেছে। বিশ্লেষণে ধ'রে নেওয়া হবে যে

(ক) A-তে আপতিত তরঙ্গ সমতলীয় এবং তার স্পন্দনবিস্তার স্বল্পমাত্রা ;

(খ) তরঙ্গ-ক্রিয়ায় সরণ AA' ($=\xi$ বা y) দুই ছেদের অন্তর δx-এর তুলনায় অনেক ছোট ;

(গ) আবার দুই ছেদের অন্তর AB ($=\delta x$) আপতিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) তুলনায় অনেক ছোট ;

(ঘ) স্পন্দনের পর্যায়কালের (T) তুলনায় δt অনেক ছোট ;

(ঙ) তরঙ্গবাহী মাধ্যম অ-সীমিত এবং নিরন্তর ;

(চ) সংকোচন বা সংনমন যৎসামান্য ($-\partial\xi/\partial x = s \ll 1$)।

আগের অনুচ্ছেদের বিশ্লেষণ অনুসরণ ক'রে আমরা পাব $t = t$ নিমেষে বিকৃতি $= -(\partial\xi/\partial x)$ এবং তার দরুন উদ্ভূত শাব্দ-চাপ $p = -K. \partial\xi/\partial x$; এই চাপ A' ছেদে সক্রিয়। তাহলে B' ছেদে সক্রিয় চাপ হবে

$$p + \delta p = p + \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\delta x$$

দুই ছেদে সক্রিয় শাব্দ-চাপ p এবং $p + \delta p$ স্থিতিস্থাপকতা ধর্মের দরুন বিপরীতমুখী। এদের সম্মিলিত ক্রিয়ায় উৎপন্ন হয়—

(ক) সমান ও বিপরীতমুখী শাব্দ-চাপের দরুন উদ্ভূত বল ps, প্রতিমিত (balanced) বলসংস্থা ; তার ক্রিয়ায় মাধ্যম সংকুচিত হয় এবং (খ) অপ্রতিমিত লব্ধিবল $(\partial p/\partial x)\ \delta x$, যে $A'B'$-এর মধ্যবর্তী উপাদানকে B-র দিকে ঠেলে আগের অবিক্ষুব্ধ অবস্থায় ফিরিয়ে আনতে চায়। এখন,

$$p = -K\ \partial\xi/\partial x \quad \text{অর্থাৎ} \quad \frac{\partial p}{\partial x} = -K\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

আবার নিউটনের দ্বিতীয় সূত্রানুসারে যে জাড্যবল $A'B'$ স্তরে গতি সৃষ্টি করছে, তার মান হচ্ছে

$$mf = m. \left(-\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right) = \rho_0\ \delta x.1. \left(-\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right)$$

[সরণ ξ এবং ত্বরণ f বিপরীতমুখী]

$A'B'$ স্তরকে যে জাড্য-বল সরাচ্ছে সে অপ্রতিমিত লব্ধি-বল। সুতরাং

$$\rho_0\ \delta x.1. \left(-\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}\right) = 1. \frac{\partial p}{\partial x}\cdot \delta x = 1.\left(-K.\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\right)$$

$$\text{বা} \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho_0}\cdot \frac{\partial^2 \xi}{\delta x^2} \qquad (\text{৬-৩.১})$$

সুতরাং তরঙ্গের অবকল সমীকরণ থেকে পাচ্ছি, $c = \sqrt{K/\rho_0}$ (৬-৩.২) এই ফল, ওপরের অঙ্গীকারগুলি (assumptions) সাপেক্ষেই বিধিমত (rigorously) প্রযোজ্য ; অন্যত্র নয়। সাধারণ তীব্রতার একমাত্রিক শব্দতরঙ্গের বেলায় এই সূত্র মোটামুটিভাবে খাটে। যথাযোগ্য স্থিতিস্থাপক

গুণাংক ধরলে এই সূত্র কঠিনে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ (১৩-২ অনুচ্ছেদ) এবং রড বা দণ্ডে ব্যাবর্ত তরঙ্গের (১৩-১ অনুচ্ছেদ) বেলায় খাটে। কিন্তু দণ্ড বা পাতের অনুপ্রস্থ স্পন্দনের বেলায় প্রযোজ্য নয়।

পঞ্চম অঙ্গীকার অর্থাৎ মাধ্যম যে নিরন্তর তা আপাতদৃষ্টিতে গ্রহণীয় নয় —কেননা আমরা জানি মাধ্যমমাত্রেই অনুময় তথা সান্তর বা বিচ্ছিন্ন। কাজেই এই অঙ্গীকার প্রমাণ-সাপেক্ষ। গ্যাসের গতিতত্ত্বে গ্যাসকে অণুময় এবং উষ্মগতিতত্ত্বে (Thermodynamics) নীরন্ধ্র বা নিরন্তর ধরা হয়; দ্বিতীয়-ক্ষেত্রে দৃষ্টিভঙ্গী স্থূলসত্ত্বক (macroscopic)। আলোচ্য ক্ষেত্রেও আমরা এই দৃষ্টিভঙ্গী গ্রহণ করবো।

মাধ্যমে কণা বলতে আমরা এমন এক ছোট আয়তনাংশ বুঝব যার মধ্যে চাপ ও ঘনত্ব সর্বত্রই সমান। অণুগুলির তাপীয় গতি পুরোপুরি অক্রম অর্থাৎ তাদের বেগের মান এবং দিক প্রতিমুহূর্তেই বদলাচ্ছে; কাজেই প্রতিমুহূর্তে কোন এক নির্দিষ্ট আয়তনের মধ্যে কিছুসংখ্যক অণু ঢুকছে আর কিছুসংখ্যক অণু বেরিয়ে যাচ্ছে। কিন্তু আমরা ধ'রে নিই যে ঐ আয়তনে অণুর সংখ্যা সব সময়েই এক। তা হতে পারে, যদি ঐ আয়তনাংশে যতগুলি অণু ঢুকছে আর বেরিয়ে যাচ্ছে তাদের তুলনায় মোট অণুর সংখ্যা অনেক অনেক বেশী থাকে। সেই সর্তাধীনেই মাত্র ঐ আয়তনে অণুর সংখ্যা অর্থাৎ ভর-ঘনত্বের এবং চাপেরও পরিসাংখ্যিক হ্রাসবৃদ্ধি (statistical fluctuation) নগণ্য হতে পারে। পরিসংখ্যানের দৃষ্টিতেই কণাকে অপরিবর্তনীয় ধরা হয়। 6.4 চিত্রে AB স্তর আয়তনে এত বড় যে, তার মধ্যে কণার সংখ্যা অনেক এবং সেই কারণেই তার দুই প্রান্তে চাপের তফাৎ থাকতে পারে। দুই কণার মধ্যে গড় দূরত্ব x_0, যদি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) সাপেক্ষে নগণ্য হয় তাহলে মাধ্যম সরন্ধ্র হলেও, নিরন্তর ধরা যায়। বিশ্লেষণে ধরাই হয়েছে $\lambda \geqslant \delta x \geqslant x_0$; সুতরাং নিরন্তর মাধ্যমের অঙ্গীকার গ্রাহ্য ব'লে ধরা চলে। স্মর্তব্য যে, স্বনোত্তর তরঙ্গে কম্পাংক যখন খুব বেশী, λ তখন খুব ছোট এবং ৬-৩.১ সমীকরণ আর খাটে না।

৬-৪. শাব্দ-ক্ষেত্র ও তৎসম্পর্কিত কয়েকটি রাশি:

শব্দ তথা অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ, কোন মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে ছড়াতে থাকলে তার বিক্ষুব্ধ অংশে চাপ, আয়তন, ভর-ঘনত্ব সবই স্বাভাবিক মান থেকে পর্যায়ক্রমে বাড়া-কমা করতে থাকে। যতখানি জায়গা জুড়ে এই পরিবর্তন

হয়ে থাকে, তাকে শাব্দ-ক্ষেত্র (Sound Field) বলে। এই পরিবর্তনগুলি নির্দিষ্ট করতে কয়েকটি রাশি—**শাব্দ-ক্ষেত্র প্রাচলের**—অবতারণা করা হয়েছে। তাদের সংজ্ঞা, প্রতীক ও সম্পর্ক নিচের তালিকায় বলা হচ্ছে—

(১) **আয়তন-প্রসারণাংক** (Dilatation, $\triangle$): মাধ্যমের কোন আয়তনাংশের আয়তন-বৃদ্ধি (δV) এবং প্রাথমিক আয়তনের (V_0) অনুপাতই হচ্ছে এই রাশিটি; অর্থাৎ তাকে আয়তন-তথি বা বিকৃতিও বলা যায়। সংজ্ঞানুসারে,

$$\triangle = \delta V/V_0\ ;\ \text{এখন}\ V = V_0 + \delta V = V_0(1+\triangle) \quad (৬\text{-}৪.১)$$

(২) **ভর-ঘনত্বাংক** (Condensation, s): মাধ্যমের কোন আয়তনাংশের ঘনত্ববৃদ্ধি ($\delta\rho$) এবং প্রাথমিক ঘনত্বের (ρ_0) অনুপাতকে ভর-ঘনত্বাংক বা **সংকোচনাংক** বলে। সংজ্ঞানুসারে,

$$s = \delta\rho/\rho_0\ \text{এবং}\ \rho = \rho_0 + \delta\rho = \rho_0(1+s) \qquad (৬\text{-}৪.২)$$

মাধ্যমের যেকোন ক্ষুদ্র আয়তনাংশের কথা বিবেচনা করলে,

$$\rho V = \rho_0 V_0\ \text{বা}\ \frac{\rho V}{\rho_0 V_0} = (1+s)(1+\triangle) = 1 \qquad (৬\text{-}৪.৩)$$

এখন s ও $\triangle$ দুইই ছোট ভগ্নাংশ; সুতরাং তাদের গুণফল দ্বিতীয় ক্রমের বা ক্ষুদ্রতর ভগ্নাংশ, অতএব নগণ্য।

$$\therefore\ 1 + s + \triangle = 1\ \text{বা}\ s = -\triangle \qquad (৬\text{-}৪.৪)$$

অর্থাৎ ভর-ঘনত্বাংককে ঋণাত্মক আয়তন-তথিও বলা চলে।

(৩) **বাড়তি বা শাব্দ** (Excess or acoustic) **চাপ**: সাধারণভাবে অনুদৈর্ঘ্য চাপের ক্রিয়ায় মাধ্যমের কোন স্তরের নিমেষ-চাপ (P) স্বাভাবিক চাপের (P_0) চেয়ে কম বা বেশী হয়। দুই চাপের তফাৎকে ($P - P_0$) বাড়তি চাপ বলে এবং শব্দতরঙ্গে এই চাপভেদকে শাব্দ-চাপ (p) বলে। ঘনীভবনে p ধনাত্মক আর তনুভবনে ঋণাত্মক। শাব্দ-ক্ষেত্রে এই রাশিটিই সর্বাধিক গুরুত্বপূর্ণ; এর সাহায্যেই আজকাল শাব্দ-ক্ষেত্রে বেশীর ভাগ মাপজোখ করা হয়।

(৪) **আয়তন-বিকার-গুণাংক** (Bulk modulus): মাধ্যমের V_0 আয়তনাংশে δP চাপবৃদ্ধিতে যদি δV পরিমাণ আয়তন-পরিবর্তন হয়, তবে

চাপবৃদ্ধি (δP) এবং আয়তন-বিকারের ($\delta V/V_0$) অনুপাতকে আয়তন-বিকার-গুণাংক বা আয়তনাংক বলে।

$$\therefore \quad K=\frac{\delta P}{-\delta V/V_0}=-V_0\frac{\delta P}{\delta V}$$

শাব্দ-ক্ষেত্রে $\delta P=p$ (শাব্দ-চাপ) এবং $\delta V/V_0=\Delta$ (আয়তন-তাঁত) $=-s$ (ঘনত্বাংক)।

$$\therefore \quad K=-p/\Delta=p/s \text{ বা } p=Ks \qquad (৬\text{-}৪.৫)$$

শাব্দ-ক্ষেত্রের ভিন্ন ভিন্ন রাশিগুলি বোঝাতে নিম্নোক্ত প্রতীকগুলি ব্যবহার করা হবে—

$x=$ মাধ্যমের কোন কণার অবিচলিত অবস্থায় স্থানাংক

$\xi=$ অবিচলিত অবস্থান থেকে x-অক্ষ বরাবর কোন কণার সরণ

$v=\partial\xi/\partial t=$ কণার নিমেষবেগ। $\xi=f(x, t)$ ব'লে এখানে তার আংশিক ব্যুৎপত্তি (derivative) ব্যবহার করা হয়েছে। x যেকোন নির্দিষ্ট কণার পক্ষে স্থির রাশি।

$\Delta=$ প্রসারণাংক $=\delta V/V_0=\partial\xi/\partial x$ (৬-২ অনুচ্ছেদ) $=-s$

$\rho=$ কোন বিন্দুতে নিমেষ-ভর-ঘনত্ব

$\rho_0=$ অবিচলিত মাধ্যমে ভর-ঘনত্ব

$s=$ ভর-ঘনত্বাংক $=\delta\rho/\rho_0=-\dfrac{\partial\xi}{\partial x}=-\Delta$

$P=$ মাধ্যমের কোন বিন্দুতে নিমেষ-চাপ

$P_0=$ অবিক্ষুব্ধ মাধ্যমে স্বাভাবিক চাপ

$p=$ কোন বিন্দুতে বাড়তি বা শাব্দ চাপ $=P-P_0=Ks=c^2\rho_0 s$

$c=$ মাধ্যমে তরঙ্গবেগ

সমতলীয় শব্দতরঙ্গে দেশ- (x) এবং কাল- (t) সাপেক্ষে কণার সরণ (ξ) এবং বেগ (v) আর মাধ্যমের শাব্দ-চাপ (p), সংকোচন (s) এবং ঘনত্বভেদ ($\delta\rho$) এই ক'টি রাশির পর্যাবৃত্ত পরিবর্তন হতে থাকে ; কাজেই এদের প্রত্যেকের বেলাতেই তরঙ্গের অবকল সমীকরণ প্রযোজ্য। যেকোন এক-কম্পাংক (monochromatic) দোলজাতীয় (harmonic) তরঙ্গ $+x$ অভিমুখে চললে শাব্দপ্রাচল-সম্পর্কিত সূত্রগুলি এইভাবে লেখা চলে—

(ক) কণার সরণ $\xi = \xi_m \cos(\omega t - \beta x)$ (৬-৪.৬)

(খ) কণাবেগ
$$v = \partial\xi/\partial t = -\omega\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= -v_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= v_m \cos(\omega t - \beta x + \pi/2) \qquad (৬\text{-}৪.৭)$$

(গ) সংকোচন
$$s = -\partial\xi/\partial x = -\beta\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= -s_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= s_m \cos(\omega t - \beta x + \pi/2) \qquad (৬\text{-}৪.৮)$$

(ঘ) আয়তন-তন্তি
$$\Delta = \partial\xi/\partial x = \beta\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= \Delta_m \cos(\omega t - \beta x - \pi/2) \qquad (৬\text{-}৪.৯)$$

(ঙ) ঘনত্বভেদ
$$\delta\rho = \rho_0 s = -\rho_0\beta\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= (\delta\rho)_m \cos(\omega t - \beta x + \pi/2) \qquad (৬\text{-}৪.১০)$$

(চ) শাব্দ চাপ
$$p = Ks = -K\beta\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= -c^2\rho_0\beta\,\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= -c\rho_0 . c\beta\,\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= -c\rho_0\omega\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= -c\rho_0 v_m \sin(\omega t - \beta x)$$
$$= p_m \cos(\omega t - \beta x + \pi/2) \qquad (৬\text{-}৪.১১)$$

৬-৫. শাব্দ-ক্ষেত্রে শক্তি ও শক্তি-ঘনত্ব :

সচল তরঙ্গ, মাধ্যমে শক্তি স্থানান্তরিত করে। তরঙ্গ চলাকালে মাধ্যমের কণাগুলির স্পন্দন হতে থাকে। তাদের স্পন্দনশক্তি মাধ্যমের বাড়তি শক্তি; তরঙ্গের অনুপস্থিতিতে এই শক্তি মাধ্যমে ছিল না। যেকোন নিমেষেই এই শক্তির কিছুটা গতিশক্তি আর কিছুটা স্থিতিশক্তি। মাধ্যমের একক আয়তনে কণাগুলির মোট স্পন্দনশক্তিকে **শক্তি-ঘনত্ব** বলে। ৫-১১ ও ৫-১৫ অনুচ্ছেদে আমরা সচল ও স্থাণু তরঙ্গবিক্ষুব্ধ মাধ্যমে শক্তি এবং শক্তি-ঘনত্ব আলোচনা করেছি। এখন আমরা প্রথমে শব্দ-তরঙ্গের মোট স্পন্দন-শক্তি এবং পরে কোন নিমেষে গতি ও স্থিতিশক্তির মান আলাদা আলাদা ক'রে বার করবো।

ক. মোট স্পন্দন-শক্তি : ধরা যাক, A প্রস্থচ্ছেদের একটা সোজা লম্বা নলের মধ্যে একটা পিস্টন আনাগোনা ক'রে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ সৃষ্টি করছে; তার ফলে একটা শাব্দ-চাপের (p) সৃষ্টি হচ্ছে এবং কার্য হচ্ছে। পিস্টনের মধ্যক অবস্থান $x = 0$ ধরলে, যেকোন নিমেষে তার সরণ ও বেগ হবে—

$$\xi = \xi_m \cos(\omega t - \beta x) \text{ এবং } \dot{\xi} = -\omega\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$

স্পন্দনশীল পিস্টন, নলে আবদ্ধ বায়ুর ওপর

(ক) $P = (P_0 + p) = [P_0 + K(-\delta\xi/\delta x)_{x=0}]$ পরিমাণ চাপ সৃষ্টি করছে

(খ) $dW = PA.\ \xi$ পরিমাণ কার্য করছে, এবং

(গ) $dW/dt = AP.\ \dot{\xi}$ হারে কার্য করছে।

$$\text{এখন } AP.\frac{\delta\xi}{\delta t} = A\left[P_0 - K\frac{\delta\xi}{\delta x}\right].\frac{\delta\xi}{\delta t}$$

$$= A\left[P_0\dot{\xi} - K\frac{\delta\xi}{\delta x}.\dot{\xi}\right]$$

$$= A[-P_0\omega\xi_m \sin(\omega t - \beta x)$$

$$+ K\beta\xi_m \sin(\omega t - \beta x)\,\omega\xi_m \sin(\omega t - \beta x)]$$

$$= A[K\beta\omega\,\xi_m^2 \sin^2(\omega t - \beta x)$$

$$- P_0\omega\,\xi_m \sin(\omega t - \beta x)] \qquad (৬\text{-}৫.১)$$

পিস্টনের একবার আসা-যাওয়াতে অর্থাৎ এক পুরো চক্রে, গড় কার্যহার হচ্ছে

$$\overline{\frac{dW}{dt}} = A.\ K\beta\omega\ \xi_m^2.\tfrac{1}{2}$$

[কেননা এক পুরো চক্রে sin পদের গড় মান শূন্য, $\sin^2$ পদের $\frac{1}{2}$]

$$= \tfrac{1}{2}A.\ c^2\rho_0.\ \omega/c.\ \omega\xi_m^2 = \tfrac{1}{2}A.\ c\rho_0\ \omega^2\ \xi_m^2$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho_0\ (\omega\xi_m)^2.\ (cA) = \tfrac{1}{2}\rho_0\ v_m^2.V_0\ [৬\text{-}৪.৭] \qquad (৬\text{-}৫.২)$$

এক সেকেণ্ডে মাধ্যমের c দৈর্ঘ্য জুড়ে আন্দোলন ছড়িয়েছে ব'লে বিক্ষুব্ধ আয়তন $cA = V_0$; কাজেই শক্তি-ঘনত্ব তথা একক আয়তনে সঞ্চিত মোট স্পন্দনশক্তির পরিমাণ

$$\overline{E} = \tfrac{1}{2}\rho_0\ v_m^2 \qquad (৬\text{-}৫.৩)$$

এই প্রসঙ্গে স্মর্তব্য যে, মাধ্যমে বিভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বেগ ভিন্ন হলে, অর্থাৎ বিচ্ছুরণ ঘটলে এই বিশ্লেষণ অচল। স্বন-তরঙ্গের ক্ষেত্রে ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকের তরঙ্গের বিচ্ছুরণ হয় না ব'লে এই চিন্তা নিষ্প্রয়োজন। স্বল্পদৈর্ঘ্য স্বনোত্তর তরঙ্গের বেলায় এই বিচার প্রাসঙ্গিক।

খ. স্পন্দনজনিত গতিশক্তি ঃ ধরা যাক, নলের মধ্যে দিয়ে $+x$ অভিমুখে সমতলীয় দোলজাতীয় শব্দতরঙ্গ বায়ু-মাধ্যমের মধ্যে (6.4 চিত্র) দিয়ে এগোচ্ছে। $AB\ (=\delta x)$ আয়তনকে এত স্বল্পপ্রস্থ নেওয়া যাক, যাতে তার মধ্যে প্রতিটি কণাই সমবেগ (v) ধরা যেতে পারে। তাহলে এই আয়তনাংশে কণাদের মোট গতিশক্তি দাঁড়াবে

$$\delta E_k = \tfrac{1}{2}\rho_0 V_0\, v^2 \qquad (৬\text{-}৫.৪)$$

এখানে ρ_0 এবং V_0, AB আয়তনাংশের স্বাভাবিক ভর-ঘনত্ব এবং আয়তন। এখন যেকোন নিমেষে কণাবেগ

$$v^2 = \xi_m{}^2\omega^2.\ \sin^2(\omega t - \beta x) = v_m{}^2\ \sin^2(\omega t - \beta x) \qquad (৬\text{-}৫.৪ক)$$

কিন্তু পূর্ণ পর্যায়কালে কাল (t)-সাপেক্ষে $\sin^2$ পদের গড় মান $1/2$; সুতরাং AB আয়তনাংশে কণাদের গড় গতিশক্তির মান হবে

$$\overline{\delta E_k} = \tfrac{1}{2}\rho_0 V_0 .\ \tfrac{1}{2}v_m{}^2 = \tfrac{1}{4}\rho_0 V_0 v_m{}^2 = \tfrac{1}{4}\rho_0 V_0 \omega^2 \xi_m{}^2 \qquad (৬\text{-}৫.৫)$$

আবার একই ভাবে এক তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) দূরত্বের মধ্যে দেশ (βx)-সাপেক্ষে v^2-এর গড় মানও (space average) $\tfrac{1}{2}v_m{}^2$ হবে। কাজেই দেশ-সাপেক্ষে গতিশক্তির গড় মান আর কাল-সাপেক্ষে তার গড় মান দুইই ৬-৫.৫ অনুচ্ছেদ থেকে মিলবে। এখানে দেশ বলতে এক তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ), আর কাল বলতে এক পর্যায়কাল (T) বোঝাচ্ছে।

অতএব কাল- বা দেশ-সাপেক্ষে গতিশক্তির গড় ঘনত্ব

$$\overline{E_k} = \tfrac{1}{4}\ \rho_0 v_m{}^2 = \tfrac{1}{4}\ \rho_0 \omega^2 \xi_m{}^2 \qquad (৬\text{-}৫.৬)$$

গ. স্থিতিশক্তি ঃ মাধ্যমের কোন আয়তনাংশের ওপর চাপ বাড়ালে তার আয়তন কমে, সুতরাং কার্য করা হয়, ফলে স্থিতিশক্তি বাড়ে। P_0 থেকে চাপ সামান্য বেড়ে P হলে এবং তার দরুন সামান্য আয়তন-হ্রাস dV হলে, কৃত কার্য তথা স্থিতিশক্তির বৃদ্ধির মান হয়

$$\delta E_p = \int_{P_0}^{P} P.(-dV) = V_0 \int_{P_0}^{P} P.dP\ \frac{-dV}{V_0.dP}$$

$$= V_0 \int_{P_0}^{P} P.dP \left(\frac{-dV/V_0}{dP}\right) = V_0 \int_{P_0}^{P} P.dP \left(\frac{1}{K}\right)$$

$$=\frac{V_0}{2K}(P^2-P_0^2)=\frac{V_0}{2K}[(P_0+p)^2-P_0^2]$$

$$=\frac{V_0}{2K}(p^2+2pP_0) \qquad (৬\text{-}৫.৭)$$

আবার ৬-৪.১১ থেকে, $p=p_m\cos(\omega t-\beta x+\pi/2)$

$$=p_m\sin(\omega t-\beta x) \qquad (৬\text{-}৫.৭ক)$$

অর্থাৎ কাল ও দেশ দুই সাপেক্ষেই p দোলরাশি ; তাহলে এক পর্যায়কালে বা এক তরঙ্গদৈর্ঘ্যে p^2-এর গড় মান $p_m^2/2$ এবং p-র গড় মান শূন্য। সুতরাং

$$\overline{\delta E_p}=\frac{V_0}{2K}\cdot\frac{1}{2}p_m^2=\frac{V_0 p_m^2}{4K} \qquad (৬\text{-}৫.৮)$$

$$=\frac{V_0}{4K}(c\rho_0\, v_m^2)$$

$$=\frac{V_0}{4\rho_0 c^2}\cdot c^2\rho_0^2 v_m^2$$

$$=\tfrac{1}{4}V_0\rho_0\, v_m^2=\tfrac{1}{4}V_0\rho_0\omega^2\xi_m^2 \qquad (৬\text{-}৫.৯)$$

৬-৫.৫ আর ৬-৫.৯ থেকে দেখা যাচ্ছে, $\overline{\delta E_k}=\overline{\delta E_p}$; কাজেই কাল বা দেশ সাপেক্ষে মাধ্যমের মোট শক্তির গড় মান

$$\overline{\delta E}=\overline{\delta E_k}+\overline{\delta E_p}=\tfrac{1}{2}\rho_0 V_0 v_m^2$$

এই মান ৬-৫.২-এর সঙ্গে অভিন্ন। মোট শক্তিকে আবার শাব্দ-চাপ-বিস্তার p_m দিয়েও প্রকাশ করা সম্ভব। ৬-৫.৮ থেকে,

$$\overline{\delta E_p}=\frac{V_0}{2K}\cdot\frac{p_m^2}{2} \text{ এবং } \overline{\delta E}=2\,\overline{\delta E_p}=\frac{V_0 p_m^2}{2K}$$

$\therefore$ গড় শক্তি-ঘনত্ব $\overline{E}=\overline{\delta E_p}/V_0$

$$=\tfrac{1}{2}\cdot\frac{p_m^2}{K}=\tfrac{1}{2}\frac{p_m^2}{\rho_0 c^2} \qquad (৬\text{-}৫.১০)$$

ঘ. শাব্দ-ক্ষেত্রে সঞ্চিত শক্তির বৈশিষ্ট্য : অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গে কোন নির্দিষ্ট মুহূর্তে স্থিতি- ও গতি-শক্তি সমদশা, কারণ এদের মান যথাক্রমে p^2-এর (৬-৫.৮) এবং v^2-এর (৬-৫.৪) ওপর নির্ভর করে, আর ৬-৫.৭ক এবং ৬-৫.৪ক থেকে দেখছি যে, তারা সমদশা। এইখানে স্পন্দনে এবং তরঙ্গে

সঞ্চিত শক্তির তফাৎ (৫-১ অনুচ্ছেদ) ; স্পন্দনে তাদের মধ্যে দশাভেদ $\pi/2$—গতিশক্তি যখন চরম (সরল দোলক মধ্যক অবস্থান অতিক্রম করছে), স্থিতিশক্তি তখন শূন্য। আর তরঙ্গে তারা একই সঙ্গে চূড়ান্ত মানে পৌঁছয় (ঘনীভূত আয়তনাংশে মাঝের প্রস্থচ্ছেদে বাড়তি চাপ এবং

চিত্র 6.5—সমতলীয় শব্দতরঙ্গে দেশ-সাপেক্ষে শক্তির বণ্টন

উৎপন্ন বেগ একই সঙ্গে চরম মান)। 6.5 চিত্রে দূরত্ব-সাপেক্ষে সমতলীয় শব্দতরঙ্গে শক্তির বণ্টন দেখানো হয়েছে। চরম ও অবম শক্তি-সঞ্চয় যে পর্যায়ক্রমে ঘটে, তা দেখা যাচ্ছে।

৬-৬. শাব্দ-তীব্রতা :

এক সেকেণ্ডে একক ক্ষেত্রফলের মধ্যে দিয়ে তার লম্ব বরাবর যতটা শব্দশক্তি অতিক্রম ক'রে যায় তাকে ঐ ক্ষেত্রের কোন বিন্দুতে সেই নির্দিষ্ট দিকে শাব্দ-তীব্রতা বলে ; একে একক ক্ষেত্রে গড় শাব্দ-ক্ষমতা তথা শাব্দ-শক্তি-ধারাও বলা যায়। আমাদের কানে শব্দপ্রাবল্যের (loudness) যে অনুভূতি হয়, তার সঙ্গে এই রাশিটি বিশেষভাবে জড়িত।

কোন শাব্দ-ক্ষেত্রে সেকেণ্ডে গড়ে δW হারে যদি শাব্দ-শক্তি লম্বভাবে δS ক্ষেত্র অতিক্রম করে, তাহলে গড় শাব্দ-তীব্রতা হয় $I_a = \delta W/\delta S$; δS নগণ্য হলে প্রসারমুখ বরাবর ঐ বিন্দুতে শাব্দ-তীব্রতা দাঁড়াবে

$$I = Lt_{\delta s \to 0} \frac{\delta W}{\delta S} = \frac{dW}{dS} \qquad (৬\text{-}৬.১)$$

তীব্রতার মাত্রক (dimension) তাহলে হচ্ছে, ক্ষমতা/ক্ষেত্র তথা শক্তি/সময়/ক্ষেত্র ; কাজেই তাকে ওয়াট/সেমি^{2} বা জুল/সে/(সেমি)^2 এককে প্রকাশ করতে হবে।

সমতলীয় তরঙ্গে যতখানি শক্তি সেকেণ্ডে একক ক্ষেত্র অতিক্রম করে তা নিশ্চয়ই, একক ক্ষেত্রফলবিশিষ্ট এবং c (তরঙ্গবেগ) দৈর্ঘ্যের এক আয়তনাংশের মধ্যে, থাকবে ; অর্থাৎ

শাব্দ-তীব্রতা = তরঙ্গবেগ × শক্তি-ঘনত্ব

$$\text{বা} \quad I = \overline{E} \times c = \tfrac{1}{2}\frac{p_m^2}{\rho_0 c^2} \times c = \frac{p_m^2}{2\rho_0 c} \qquad (৬\text{-}৬.২)$$

$$= 2\pi^2 \xi_m^2 n^2 \rho_0 c \; [\text{ ৬-২.৪ সমীকরণ }] \qquad (৬\text{-}৬.৩)$$

৬-৬.২ এবং ৬-৬.৩ সমীকরণ শাব্দ-তীব্রতার ব্যঞ্জক। তা ছাড়াও বিকল্পরূপেও এদের প্রকাশ করা যায়—

$$(\text{ক}) \quad I = \frac{1}{\rho_0 c} \cdot \frac{p_m^2}{2} = \frac{p^2_{r.m.s.}}{\rho_0 c} \quad [\, p_{r.m.s.} = p_m/\sqrt{2} \,] \qquad (৬\text{-}৬.৪)$$

$$(\text{খ}) \quad I = c \times \overline{E} = c \times \tfrac{1}{2}\rho_0 v_m^2 \; [৬\text{-}৫.৩] = \rho_0 c\, v_{rms}^2$$

$$= \rho_0 c v_{rms} \times v_{rms}$$

$$= p_{rms} \times v_{rms} \qquad (৬\text{-}৬.৫)$$

[কেননা ৬-৫.৩ এবং ৬-৫.১০ থেকে $\rho_0 v_m^2 = p_m^2/\rho_0 c^2$

বা $p_m^2 = \rho_0^2 c^2 v_m^2$] (৬-৬.৬)

শাব্দ-ক্ষমতা : যান্ত্রিক ক্ষমতা = বল × বেগ ; সেইরকম শাব্দ-ক্ষমতা = শাব্দ চাপ (p) × কণাবেগ (v)। এখন

$$pv = p_m \sin(\omega t - \beta x) \times v_m \sin(\omega t - \beta x)$$

$$= p_m v_m \sin^2(\omega t - \beta x)$$

পুরো এক চক্র পরিবর্তনের জন্য গড় মান হবে

$$\overline{pv} = \tfrac{1}{2} p_m v_m = \tfrac{1}{2} p_m \frac{p_m}{c\rho_0} = I \quad [\text{ ৬-৬.৬ }] \qquad (৬\text{-}৬.৭)$$

অর্থাৎ গড় শাব্দ-ক্ষমতা ($\overline{pv}$) শাব্দ তীব্রতার সমান। $c\rho_0$ রাশিটিকে মাধ্যমের আপেক্ষিক বাধ (Z_s) বলে।

মাধ্যমের বিশিষ্ট (Characteristic) বা আপেক্ষিক বাধ (Specific impedance) : ৬-৬.৬ থেকে $v_m = p_m/\rho_0 c$ সম্পর্কটি পাওয়া যাচ্ছে। লক্ষণীয় যে, এই সম্পর্কটি পরবশ স্পন্দনে $v_m = F/Z_m$ এবং

প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহে ওহ্‌ম সূত্রের ($I = E/Z_E$) সঙ্গে তুলনীয়। চাপ p_m তড়িচ্চালক বল E-এর এবং $c\rho_0$, বৈদ্যুতিক বাধ Z_E-এর সমতুল। তাই থেকে $c\rho_0$ রাশিটিতে মাধ্যমের বিশিষ্ট বাধ ($=Z_s$) বলা হয়েছে। পরবর্তী অধ্যায়ে আমরা এ-সম্বন্ধে আরও বিস্তারিত আলোচনা করবো।

উদাহরণ ঃ (১) 256 কম্পাংকের সমতলীয় শাব্দ-তরঙ্গের সরণবিস্তার 0.001 সেমি এবং বেগ 330 মি/সে ; বায়ুর ঘনত্ব 0.001293 gms/cc হলে—শক্তি-ঘনত্ব, শক্তিস্রোত এবং তীব্রতা বার কর।

শক্তি-ঘনত্ব $= 2\pi^2 n^2 \xi_0 \rho_0 = 2\pi^2 (256)^2 \times (0.001)^2 \times 0.001293$ $= 1.668$ মিলি-আর্গ/ঘন-সেমি। শক্তিস্রোত = তীব্রতা = শক্তি-ঘনত্ব × তরঙ্গবেগ $= 1.668 \times 10^{-3} \times 33000 = 55.04$ আর্গ/বর্গ-সেমি।

(২) বায়ুতে শাব্দ-তীব্রতা 10^{-16} ওয়াট/বর্গ-সেমি হলে, দেখাও যে, *rms* শাব্দ চাপ প্রতি বর্গ-সেমি 0.0002 ডাইন হবে। (বায়ুতে শব্দবেগ 330 মি/সে এবং বায়ুর ঘনত্ব ঘন-সেমি প্রতি 0.0013 গ্রাম)

৬-৬.৪ সমীকরণ থেকে, $p_{rms}{}^2 = I\rho_0 C$

$$= 10^{-16} \times 10^7 \ \frac{\text{আর্গ}}{\text{সেমি}^2} \times 0.0013 \ \frac{\text{গ্রাম}}{\text{সেমি}^3} \times 33000 \text{ সেমি/সে}$$

$$= 10^{-9} \times 13 \times 10^{-4} \times 33 \times 10^3 \left(\frac{\text{ডাইন}}{\text{সেমি}^2}\right)^2$$

$$\therefore \quad p_{rms} = \sqrt{3.3 \times 13 \times 10^{-9}} \ \frac{\text{ডাইন}}{\text{সেমি}^2} = 2.07 \times 10^{-4}$$

$$\simeq 0.0002 \text{ ডাইন/সেমি}^2$$

৬-৭. গ্যাস-মাধ্যমে শব্দের বেগ ঃ

৬-৩.২ সমীকরণে আমরা দেখেছি যে, প্রবাহী মাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য বা শব্দতরঙ্গের বেগ মাধ্যমের আয়তন-বিকার-গুণাংক (K) এবং অবিক্ষুব্ধ ঘনত্ব (ρ_0)-নির্ভর। গ্যাসের ক্ষেত্রে চাপের (P) সঙ্গে আয়তনাংকের সম্পর্ক ঘনিষ্ঠ। সুতরাং গ্যাসীয় মাধ্যমে শব্দের বেগ চাপ-নির্ভর। আবার অবিক্ষুব্ধ ঘনত্ব (ρ_0) উষ্ণতা-নির্ভর। এখন V আয়তনের গ্যাসে δP চাপ-পরিবর্তনে যদি δV আয়তন-হ্রাস হয়, তাহলে হুকের সূত্র থেকে

$$K = \frac{\delta P}{-\delta V/V} = -V \frac{\delta P}{\delta V}$$

এখন চাপ ও আয়তনের পরিবর্তন খুব সামান্য বা সীমান্থ (limiting) হলে,

$$K = -V\frac{dP}{dV} \qquad (৬\text{-}৭.১)$$

(ক) নিউটনের সূত্র (সমোষ্ণ মান): নিউটন ভেবেছিলেন যে, শব্দতরঙ্গ মাধ্যমে এত ধীরে চলে যে, ঘনীভবনে উদ্ভূত তাপ চারিদিকে ছড়িয়ে যাওয়ার সময় পায়—স্তরের উষ্ণতা বাড়ে না। কাজেই চাপ ও আয়তনের পরিবর্তন সমোষ্ণ এবং তাই বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য। তখন গ্যাসের আয়তনাংক তার অবিক্ষুব্ধ চাপের সমান। কেননা বয়েলের সূত্র $PV=$ ধ্রুবক, এই সম্পর্ককে অবকলন ক'রে পাওয়া যায়

$$PdV + VdP = 0$$

অর্থাৎ $P = -\dfrac{VdP}{dV} = K_\theta$

$$\therefore \quad c = \sqrt{K_\theta/\rho_0} = \sqrt{P/\rho_0} \qquad (৬\text{-}৭.২)$$

স্বভাবী চাপ ও উষ্ণতায় (N.T.P.) বায়ুতে শব্দের বেগ হওয়ার কথা

$$c_0 = \sqrt{\frac{76 \times 981 \times 13.59 \text{ dynes/cm}^2}{0.001293 \text{ gms/cc}}} = 280 \text{ মি/সে}$$

কিন্তু পরীক্ষালব্ধ বেগ 331.4 মি/সে

(খ) ল্যাপলাসের সূত্র (রুদ্ধতাপ মান): এই ফরাসী গণিতজ্ঞ বললেন যে, শব্দ চললে বায়ুস্তরের সংকোচন এবং প্রসারণ এত দ্রুতগতি যে, কুপরিবাহী বায়ুর মধ্যে তাপ তাড়াতাড়ি ছড়াতে পারে না, কাজেই স্তরের তাপমাত্রা বাড়ে। তখন চাপ-আয়তনের পরিবর্তন সমোষ্ণ হয় না, রুদ্ধতাপ হয় এবং তখন প্রযোজ্য সূত্র $PV^\gamma =$ ধ্রুবক। তাহলে অবকলনে হয়

$$\gamma PV^{\gamma-1}.\, dV + V^\gamma .\, dP = 0$$

বা $\gamma P = -V^\gamma .\, dP/V^{\gamma-1}.\, dV = -V.\, dP/dV = K_s$

$$\therefore \quad c = \sqrt{K_s/\rho_0} = \sqrt{\gamma P/\rho_0} \qquad (৬\text{-}৭.৩)$$

ধ্রুবক γ হচ্ছে বায়ুর স্থির চাপ এবং স্থির আয়তনে দুই আপেক্ষিক তাপের অনুপাত এবং তার মান 1.41 ; সুতরাং

$$c_0 = \sqrt{1.41P/\rho_0} = \sqrt{1.41} \times 280 \text{ মি/সে} = 331 \text{ মি/সে}$$

গণিতীয় হিসাব থেকে দেখানো যায় যে $K_s/K_t = \gamma$; কাজেই ল্যাপলাসের সূত্রে $\gamma = 1$ ধরলে নিউটনের সূত্র মেলে।

উষ্মগতিবিজ্ঞানের আলোচনা ক'রে স্টোক্স দেখিয়েছেন যে বায়ুর চাপের সঙ্গে আয়তনের পরিবর্তন, হয় সমোষ্ণ, না হয় রুদ্ধতাপ হবে, মাঝামাঝি কোন রকম হতে পারে না। তা যদি হ'ত তাহলে শব্দের তনুভবন অতি দ্রুত হ'ত, অল্প দূরেই শব্দ মিলিয়ে যেত। বাস্তবে তা হয় না, কাজেই এই পরিবর্তন সমোষ্ণ বা রুদ্ধতাপ কোন এক শ্রেণীর, হতে হয়। ৬-৭.৩ ফল বাস্তবানুগ ব'লে এই পরিবর্তন রুদ্ধতাপ—সেই সিদ্ধান্তই চূড়ান্ত। ৬-১১ অনুচ্ছেদে দেখানো হয়েছে যে, বায়ুর আয়তন-পরিবর্তন ধীরগতি ব'লেই রুদ্ধতাপ অবস্থা বজায় থাকে।

সীমান্ত-মানের কাছাকাছি কিন্তু, স্থিতিস্থাপকতা γP $(=K)$ আর ধ্রুবক থাকে না, কারণ $K = -V\, dP/dV$ হওয়ায় P তখন চররাশি। ফলে ব্যাপ্তির সঙ্গে সঙ্গে শব্দতরঙ্গের আকার অল্প অল্প ক'রে বদলাতে থাকে। প্রবল শব্দতরঙ্গে তরঙ্গরূপের যথেষ্ট পরিবর্তন ঘটে, আর পরীক্ষায় দেখা গেছে যে, এইরকম শব্দতরঙ্গে বেগ অনিয়ত (unsteady) হয়। ৭-২ অনুচ্ছেদে এই দুই ব্যাপার নিয়ে আবার আলোচনা হবে।

(গ) গ্যাসে শব্দের বেগ এবং অণুর তাপীয় বেগ—মাধ্যমে শব্দ যখন চলে তখন বায়ুস্তরের ঘনীভবনের অবস্থা নির্দিষ্ট বেগে নির্দিষ্ট দিকে এগোতে থাকে। সেক্ষেত্র বায়ুকণার স্পন্দনবেগ অল্পই—সেকেণ্ডে 10 সেমি-র বেশী হয় না। কিন্তু গ্যাসের অণুগুলির তাপের দরুন দ্রুতবেগ থাকে—সেই বেগ মানে 10^4 থেকে 10^5 সেমি/সে পর্যন্ত এবং অক্রম-দিক্ হয় ; কেননা ধাক্কার দরুন বেগ কেবলই বদলাতে থাকে। কাজেই অণুগুলির প্রকৃত বেগ, নির্দিষ্ট দিকে স্পন্দনবেগ এবং অনির্দিষ্টদিশ্ তাপীয় বেগের সদিশ্ সমষ্টি। তাহলে বোঝা যাচ্ছে যে ক্ষুদ্রবিস্তার শব্দতরঙ্গে কণাবেগের মান মূলত তাপীয় বেগের ওপর নির্ভর করবে। তাপের কারণে যে অণুগুলি দিগ্বিদিক্শূন্য হয়ে ছুটে বেড়াচ্ছে তারা স্পন্দনশীল স্বনকে ধাক্কা খেলে, কোন নির্দিষ্ট দিকে (এখানে স্পন্দন অভিমুখে) তাদের ভরবেগ সামান্য কিছু (0.1%) বাড়বে। স্বনক, স্পন্দনের অভিমুখে ছুটন্ত কণাকে ধাক্কা দিলে, তার ভরবেগও কিছুটা বাড়বে। নির্দিষ্ট দিকে কণান্তরিত ভরবেগ যে দ্রুতিতে এক অণু থেকে অন্য অণুতে যায়, তাই-ই শব্দবেগ। স্পষ্টতই এই বেগ তাপজ বেগের ক্ষুদ্র এক ভগ্নাংশ মাত্র।

গ্যাসের গতিকতত্ত্ব থেকে চাপের সূত্র ব্যবহার ক'রে এই দুই বেগের মধ্যে

সম্পর্ক বার করা যায়। নির্দিষ্ট উষ্ণতায় গ্যাসের চাপ P, ঘনত্ব ρ এবং অণুর *r.m.s.* বেগ u হলে ঐ তত্ত্বানুসারে

$$P=\tfrac{1}{3}\rho u^2. \quad \therefore \quad u=\sqrt{3P/\rho}=\sqrt{\frac{3}{\gamma}\cdot\frac{\gamma P}{\rho}}=c\sqrt{3/\gamma}$$
(৬-৭.৪)

অর্থাৎ শব্দবেগ (c) সদাই কণাবেগের (u) চেয়ে কম ; কেননা $c/u=\sqrt{\gamma/3}$ এবং γ-র সর্বোচ্চ মান $5/3$; বায়ু প্রধানত দ্বিপারমাণবিক গ্যাস নাইট্রোজেন আর অক্সিজেনের মিশ্রণ ($\gamma=1.41$)—সুতরাং বায়ুতে নির্দিষ্ট উষ্ণতায় কণা-বেগ

$$u=c\sqrt{3./1.41} \quad \text{বা} \quad 1.46c\text{-এর সমান।}$$

৬-৮. গ্যাসে শব্দবেগের নিয়ন্ত্রক :

মাধ্যমের (ক) তাপীয় অবস্থা, (খ) আণবিক গঠন এবং (গ) তার নিজস্ব গতিবেগ, গ্যাসে শব্দের বেগ নিয়ন্ত্রণ করে। তাপীয় অবস্থা বলতে আমরা গ্যাসের চাপ এবং ঘনত্ব বুঝব, কেননা তারা উষ্ণতা এবং আর্দ্রতা-নির্ভর। তেমনি আণবিক গঠন বলতে গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের অনুপাত (γ) এবং আণবিক ওজন (M) বোঝাবে। একটি অণুতে ক'টি পরমাণু আছে তার ওপরে γ-র মান নির্ভর করে ; যেমন পরমাণুসংখ্যা 1, 2, 3, ··· হলে, γ-র মান যথাক্রমে 1.66, 1.41, 1.26, ··· হবে। আবার পরমাণুর প্রকৃতি এবং অণুতে তার সংখ্যা আণবিক ওজন স্থির করবে। স্বনকের কম্পনবৈশিষ্ট্য, কম্পাংক ও স্পন্দনবিস্তার স্বনপাল্লায় থাকলে, শব্দবেগকে প্রভাবান্বিত করে না।

আমরা ৬-৭.৩ সমীকরণকে এমন এক রূপে প্রকাশ করবো, যাতে শব্দবেগ-নিয়ন্ত্রকদের ভূমিকা স্পষ্টতর হয়ে উঠবে। যদি এক গ্রাম-অণু ভর গ্যাসের আয়তন V সিসি, চাপ P সেমি, উষ্ণতা $T^\circ K$ ও আণবিক ওজন M গ্রাম ধরি, তাহলে আদর্শ গ্যাসের বেলায়

$$PV=RT \quad \text{এবং} \quad \rho=M/V$$

$$\therefore \quad c=\sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}=\sqrt{\frac{\gamma RT/V}{M/V}}=\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \qquad (৬\text{-}৮.১)$$

ক. গ্যাসের তাপীয় অবস্থা—এখানে চাপ ও ঘনত্বের ওপর উষ্ণতার ও আর্দ্রতার প্রভাব আলোচনার বিষয়। ৬-৮.১ সমীকরণ চাপ-নিরপেক্ষ।

সুতরাং স্থির উষ্ণতায় শব্দবেগ চাপের ওপর নির্ভর করে না। সরাসরি পরীক্ষায় দেখা গেছে, পাহাড়ের ওপরে এবং সমুদ্রপৃষ্ঠে চাপ আলাদা হলেও শব্দবেগ হিসাব ক'রে সমোষ্ণ অবস্থায় আনলে অপরিবর্তিত থাকে। অবশ্য খুব বেশী চাপে বয়েলের সূত্র ($P/\rho=$ ধ্রুবক) অচল, অতএব শব্দবেগ পাল্টায়। স্বভাবী চাপের 50 গুণ বেশী চাপে বায়ুতে শব্দের বেগ 2.4% বাড়ে, আর শতগুণ বাড়লে বেগ বাড়ে মাত্র 6.4%।

ঐ সমীকরণেই দেখা যাচ্ছে $c \propto \sqrt{T}$; $\therefore\ c_t/c_0=\sqrt{T/T_0}$

$$=\sqrt{(273+t)/273}=\left(1+\frac{t}{273}\right)^{\frac{1}{2}} \simeq \left(1+\tfrac{1}{2}\cdot\frac{t}{273}\right)$$

(৬-৮.২)

এখন $c_0=331$ মি/সে ধরলে 1° উষ্ণতা বাড়লে বেগ সেকেণ্ডে 61 সেমি $(=331.\frac{1}{2}.1/273)$ বাড়ে। বেগবৃদ্ধির উষ্ণতা-গুণাংকের পরীক্ষালব্ধ মান 60.7 সেমি/সে। Kundt নল (14-9) পরীক্ষায় এর সত্যতা প্রমাণিত হয়েছে। মেরুদেশে -45°C উষ্ণতাতেও এই সূত্র খাটে দেখা গেছে।

আর্দ্রতার প্রভাব—বায়ুতে জলীয় বাষ্প থাকলে তার ঘনত্ব কমে। সুতরাং ভেজা হাওয়ায় শব্দ তুলনায় দ্রুততর চলে এবং বাষ্পের পরিমাণ যত বাড়ে বেগও তত বাড়ে।

t° উষ্ণতায় ভিজে হাওয়ার মোট চাপ P সেমি এবং শুধুমাত্র জলীয় বাষ্পের চাপ f সেমি পারদ চাপের সমান হলে, সেই উষ্ণতায় শুষ্ক বায়ুর চাপ $(P-f)$ সেমি হবে। ভিজে হাওয়ার ঘনত্ব $\rho_m=(P-f)$ চাপে 1 সিসি শুষ্ক বায়ুর ভর $+f$ সেমি চাপে 1 সিসি জলীয় বাষ্পের ভর। $(P-f)$ সেমি চাপে 1 সিসি শুষ্ক বায়ু P সেমি চাপে $(P-f)/P$ সিসির সমান হয়। শুষ্ক বায়ুর চাপ P সেমি এবং ঘনত্ব ρ_a হলে, $(P-f)$ সেমি চাপে 1 সিসি শুষ্ক বায়ুর ভর $=\rho_a\ (P-f)/P$ গ্রাম হবে।

আবার f সেমি চাপে জলীয় বাষ্পের 1 সিসি, P সেমি চাপে f/P সিসির সমান হবে

এবং P সেমি চাপে f/P সিসি জলীয় বাষ্পের ভর $=(f/P).\frac{5}{8}\rho_a$ হবে

[কেননা বায়ু-সাপেক্ষে জলীয় বাষ্পের ঘনত্ব 5/8]

$$\rho_m = \rho_a \frac{P-f}{P} + \frac{f}{P} \cdot \tfrac{5}{8}\, \rho_a = \frac{\rho_a}{P}(P - \tfrac{3}{8} f)$$

$$= \rho_a \left(1 - \tfrac{3}{8} \cdot \frac{f}{P}\right) \qquad (৬\text{-}৮.৪)$$

ভিজা ও শুষ্ক বায়ুতে শব্দের বেগ যথাক্রমে c_m এবং c_a হলে,

$$\frac{c_a}{c_m} = \sqrt{\frac{\gamma P/\rho_a}{\gamma P/\rho_m}} = \sqrt{\rho_m/\rho_a}$$

$$\therefore \quad c_a = c_m \sqrt{1 - \tfrac{3}{8} . f/P} \qquad (৬\text{-}৮.৫)$$

পরীক্ষায় দেখা গেছে, বায়ুতে 0.01% আয়তনের জলীয় বাষ্প থাকলে শব্দবেগ সেকেণ্ডে 5 সেমি মতো বাড়ে। বায়ু প্রধানত দ্বিপারমাণবিক গ্যাস অক্সিজেন ও নাইট্রোজেনের মিশ্রণ; তাদের γ-র মান 1.41 অথচ ত্রিপারমাণবিক জলীয় বাষ্পের ক্ষেত্রে $\gamma = 1.26$ হয়। সুতরাং ভেজা হাওয়াতে বেগ ৬-৮.৫ সমীকরণের মানের তুলনায় কিছু কম ($\sqrt{1.26/1.41}$ ভাগ) হয়।

খ. গ্যাসের আণবিক গঠন—৬-৮.১ থেকে দেখা যাচ্ছে যে, ভিন্ন ভিন্ন গ্যাসে আণবিক ওজন (M) এবং আপেক্ষিক তাপদ্বয়ের অনুপাত (γ) আলাদা আলাদা ব'লে তাদের মধ্যে শব্দবেগ ভিন্ন হবে।

(১) আপেক্ষিক তাপের অনুপাত (γ)—শব্দবেগ $\sqrt{\gamma}$-র সমানুপাতে বদলায়। γ-র মান অণুতে পরমাণুসংখ্যার ওপর নির্ভর করে। তাদের সংখ্যা অণুতে 1, 2, 3, ··· ইত্যাদি হলে, γ-র মান যথাক্রমে 5/3, 7/5, 5/4, ··· ইত্যাদি হয়। কাজেই অণুতে পরমাণুসংখ্যা গ্যাসে শব্দবেগ নিয়ন্ত্রণ করে।

(২) আণবিক ভার (M)**ঃ** ৬-৮.১ থেকে আরও দেখি, গ্যাসে শব্দবেগ (c) তার অণুর ওজনের (M) বর্গের ব্যস্তানুপাতে বদলায়। কাজেই একই উষ্ণতায় হাইড্রোজেনে শব্দবেগ ($c = \sqrt{\gamma RT/M}$) অক্সিজেনের তুলনায় ($\sqrt{16 : 1}$ বা) চারগুণ বেশী।

(৩) গ্যাসের মিশ্রণ ঃ বায়ু অক্সিজেন (20.96%) ও নাইট্রোজেন (79%) ছাড়াও জলীয় বাষ্প, CO_2 এবং কয়েকটি নিষ্ক্রিয় গ্যাসের মিশ্রণ। প্রথম দুটি দ্বি-, পরের দুটি ত্রি- এবং অন্যগুলি এক-পারমাণবিক গ্যাস। সুতরাং তাদের γ এবং M দুইই আলাদা। কাজেই বায়ুতে শব্দবেগ বার করতে হলে তার কার্যকর γ এবং ρ ($= M/V$) লাগবে।

t°C উষ্ণতায় ভিন্ন ভিন্ন গ্যাসের নিজস্ব চাপ $p_1, p_2, p_3, \cdots$ ইত্যাদি, তাদের ঘনত্ব $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \cdots$ ইত্যাদি এবং মিশ্রণের মোট চাপ P হলে, মিশ্রণের কার্যকর ঘনত্ব

$$\rho = \frac{p_1 \rho_1 + p_2 \rho_2 + p_3 \rho_3 + \cdots}{p_1 + p_2 + p_3 + \cdots} = \Sigma p_i \rho_i / P \qquad (৬\text{-}৮.৬)$$

আবার তাদের নিজস্ব আপেক্ষিক তাপদ্বয়ের অনুপাত $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \cdots$ ইত্যাদি হলে, কার্যকর γ পাওয়া যায়

$$\frac{P}{\gamma - 1} = \frac{p_1}{\gamma_1 - 1} + \frac{p_2}{\gamma_2 - 1} + \frac{p_3}{\gamma_3 - 1} + \cdots = \Sigma p_i / (\gamma_i - 1) \qquad (৬\text{-}৮.৭)$$

এই দুই সম্পর্ক থেকে নির্ণীত γ এবং ρ-এর মান ৬-৮.১ সমীকরণে বসিয়ে গ্যাস-মিশ্রণে শব্দবেগ বার করা যায়। জানা চাপ এবং ঘনত্বে শব্দবেগ বার করলে, তা-থেকে গ্যাসের অণু সম্বন্ধে নানা মূল্যবান তথ্য, যেমন অণুর তাপজ অক্রম বেগ (৬-৭.৪), গ্যাসের দুই আপেক্ষিক তাপের অনুপাত (৬-৭.৩), অণুর ওজন (৬-৮.১) ইত্যাদি বার করা সম্ভব। γ-নির্ণয়ে Kundt নলে পরীক্ষণ (১৪-৯), অন্যতম স্বীকৃত ও বহুলব্যবহৃত পন্থা। আবার γ জেনে নিয়ে, তা-থেকে অণুতে পরমাণুর সংখ্যা বা অণুর স্বতন্ত্র স্পন্দনমাত্রা (degrees of freedom r), $\gamma = 1 + 2/r$ সম্পর্ক প্রয়োগ ক'রে পাওয়া যেতে পারে।

গ. বায়ুপ্রবাহ : শব্দবাহী প্রবাহী-মাধ্যম সচল হলে তার নিজস্ব বেগ শব্দবেগের সঙ্গে সরাসরি ভেক্টর হিসাবে যোগ হয়। সুতরাং বাতাস থাকলে শব্দের বেগ মাটি-সাপেক্ষে ভিন্ন ভিন্ন দিকে ভিন্ন ভিন্ন হতে পারে। এই বেগ অবশ্য মাটি-সাপেক্ষে আলাদা আলাদা হলেও, বায়ু-সাপেক্ষে অপরিবর্তিতই থাকবে। বাতাসের দিকে শব্দবেগ চরম এবং বিপরীতে অবম মান হবে। তবে বায়ুবেগ (v) শব্দবেগের (c) তুলনায় সামান্যই হয়।

ঘ. স্বনকের স্পন্দনবৈশিষ্ট্য : স্বনকের দুই স্পন্দনবৈশিষ্ট্য, কম্পনাংক (n) এবং বিস্তার (ξ_m) ; তারা যথাক্রমে শব্দতরঙ্গের দৈর্ঘ্য (λ) এবং তীব্রতা (I) নিয়ন্ত্রণ করে, কিন্তু স্বনপাল্লায় (sonic range) শব্দবেগের ওপর তাদের বিশেষ প্রভাব নেই।

(১) স্পন্দনাংকের প্রভাব : স্বন- অর্থাৎ শ্রুতিগ্রাহ্য শব্দের বেগ কম্পাংক-নিরপেক্ষ। তা যদি না হ'ত, তাহলে অর্কেস্ট্রার ভিন্ন ভিন্ন সুরের

জাতি ভিন্ন ভিন্ন দূরত্বে আলাদা আলাদা হ'ত। তত্ত্বের সিদ্ধান্ত যে, স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগ স্পন্দনসংখ্যার সঙ্গে সঙ্গে সামান্য বাড়বে—পরীক্ষায় সমর্থিত হয়েছে।

(২) **স্পন্দনবিস্তারের প্রভাব :** স্বনকের তথা তরঙ্গের স্পন্দনবিস্তার অল্পমাত্রা হলে, শব্দবেগ বিস্তারনিরপেক্ষ। কিন্তু বিস্ফোরণজনিত শব্দতরঙ্গে বিস্তার বেশী, তখন আয়তনাংক (K) আর ধ্রুবরাশি নয়, কাজেই বেগের মান আর অচর থাকে না—কেননা স্বাভাবিকের তুলনায় ঘনীভবন দ্রুততর আর তনুভবন মন্থরতর বেগে চলে। এ-ছাড়াও ঘনীভবন বেশী ঘটলে সেখানে উষ্ণতাবৃদ্ধি যথেষ্ট হয়, তাতেও গতিবেগ বাড়ে ; আবার তরঙ্গের আকারও বদলায়। ৭-২ অনুচ্ছেদে এ-বিষয়ে বিস্তারিত আলোচনা হবে। মোটামুটি-ভাবে এসব ক্ষেত্রে গতিবেগ হয়

$$c=\sqrt{\frac{K}{\rho}\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{\gamma+1}}=\sqrt{\frac{K}{\rho}(1-s)^{\gamma+1}} \qquad (৬\text{-}৮.৮)$$

উদাহরণ : (১) কোন গ্যাসের $c_p=0.240$ এবং $c_v=0.173$ ক্যালরি হলে, $0°C$ উষ্ণতায় শব্দের বেগ কত ? ($J=4{\cdot}2$ জুল/ক্যালরি)

৬-৮.১ সমীকরণ অনুসারে $c=\sqrt{\gamma RT/M}$

$$=\sqrt{\frac{c_p}{c_v}\cdot(c_p-c_v)\,J.T}$$

$$=\sqrt{\frac{0.240}{0.173}\times(0.240-0.173)\times4.2\times10^7\times273}$$

$=326.4$ মি/সে

(২) বায়ুতে $c_p=0.242$, $c_v=0.172$, $\rho_0=0.00129$ গ্রাম/সিসি এবং পারদের ঘনত্ব 13.6 গ্রাম/সিসি হলে, 100°সে উষ্ণতায় শব্দের বেগ কত ?

৬-৮.২ সমীকরণ থেকে $c_{100}=c_0\sqrt{T'/T}=\sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}\cdot\sqrt{\frac{T'}{T}}$

$$=\sqrt{\frac{0.242}{0.172}\times\frac{76\times13.6\times981}{0.00129}\times\frac{373}{273}}=388.6 \text{ মি/সে}$$

(৩) হাইড্রোজেনের কত উষ্ণতায় শব্দের বেগ 1000°C উষ্ণতায় অক্সিজেনে শব্দবেগের সমান ?

৬-৮.২ সমীকরণ থেকে $(c_{1000}/c_0)_{Oxy}$

$$=\sqrt{\frac{1000+273}{273}}=\sqrt{\frac{1273}{273}}$$

ধরা যাক t°C উষ্ণতায় হাইড্রোজেনে শব্দের বেগ 1000°C উষ্ণতায় অক্সিজেনে শব্দবেগের সমান। তাহলে

$$(c_t/c_0)_{Hy}=\sqrt{\frac{273+t}{273}}$$

আবার ৬-৮.১ সমীকরণ থেকে $(c_{Oxy}/c_{Hy})_0=\sqrt{\frac{M_{Hy}}{M_{Oxy}}}=4$

সর্তানুসারে $(c_{1000})_{Oxy}=(c_t)_{Hy}$;

সুতরাং $\frac{1273}{273}=\left(\frac{M_{Hy}}{M_{Oxy}}\right)^2\times\frac{273+t}{273}$

$\therefore$ $273+t=1273/16$, সুতরাং $t=-193.6$°C

(৪) 0°C উষ্ণতায় হাইড্রোজেনে শব্দের বেগ 4200 ফিট/সে হলে, যে গ্যাস-মিশ্রণে হাইড্রোজেন আয়তনে অক্সিজেনের দ্বিগুণ, তাতে ঐ উষ্ণতায় শব্দের বেগ কত ?

মিশ্রণের ঘনত্ব $\rho_M=\frac{\rho_H V_H+\rho_0 V_0}{V_H+V_0}=\frac{1\times 2V+16\times V}{3V}=6$

এখন মিশ্রণে বেগ c_M ধরলে, $c_M/c_H=\sqrt{\rho_H/\rho_M}=\sqrt{1/6}$

$\therefore$ $c_M=4200/\sqrt{6}=1715$ ফিট/সে

৬-৯. তরলে শব্দবেগ :

গ্যাসের মতো তরলও প্রবাহী মাধ্যম ; কাজেই তরলে শব্দের বেগ $c=\sqrt{K/\rho}$ এবং এখানেও K রুদ্ধতাপ আয়তন-বিকার-গুণাংক (K_s) হবে। কিন্তু তরল অবস্থার প্রাসঙ্গিক সব তথ্য, গ্যাসের মতো বিশদভাবে জানা নেই। সুতরাং নজির টেনে ফলাফল বিচার করা সঙ্গত হবে না। অনেক তরলের ক্ষেত্রে γ মাপা হয়েছে। জলের বেলায়, $\gamma=1.004$; সুতরাং তার ক্ষেত্রে K_s এবং K_θ সমানই ধরা যায়। সাগরজলে $\gamma=1.01$, তার্পিন তেলে 1.27, পারদে 1.13 পাওয়া গেছে। তরলে শব্দের বেগ মেপে তার রুদ্ধতাপ আয়তনাংক (K_s) বার করা যায়—তাকে শাব্দ-আয়তনাংক বলে।

তরলে আয়তনাংক এবং ঘনত্ব দুইই উষ্ণতানির্ভর, কিছুটা চাপনির্ভর; সুতরাং শব্দবেগও তাই হবে। পরীক্ষায় দেখা গেছে যে 0°C এবং 60°C-র মধ্যে বায়ুমণ্ডলের স্বভাবী চাপে পাতিত জলে শব্দের বেগ (c) এবং উষ্ণতার (t°C) মধ্যে সম্পর্ক দাঁড়ায়

$$c = 1403 + 5t - 0.06t^2 + 0.000t^3 \; m/s$$

আবার এ-ছাড়াও সাগরজলের গভীরতা এবং লবণাক্ততা শব্দবেগ বাড়ায়, কেননা একটি চাপ অপরটি ঘনত্ব বাড়ায়। এখানে

$$c = 1449 + 4.6t - 0.055t^2 + 0.0003t^3 + (1.39 - 0.012t)(s - 35) + 0.017d$$

এখানে বেগ c মি/সে, উষ্ণতা সেলসিয়াসে, লবণাক্ততা s সহস্রাংশে এবং গভীরতা d মিটারে প্রকাশ করা হয়েছে। তাত্ত্বিক গণনায়

$$c = \sqrt{\gamma K_\theta / \rho} \quad \text{এবং} \quad \gamma = (1 + \alpha^2 K_\theta \rho T / C_p)$$

এখানে K_θ সমোষ্ণ আয়তনাংক, ρ ঘনত্ব, α আয়তন-প্রসারণ-গুণাংক, T পরম-উষ্ণতা এবং C_p আগে প্রকাশিত স্থিরচাপে আপেক্ষিক তাপ।

৬-১০. শাব্দ-বিকিরণ-চাপ (Acoustic Radiation Pressure) :

এ-পর্যন্ত আমরা যে শাব্দ-চাপের আলোচনা করেছি তা প্রত্যাবর্তী-প্রকৃতি। সুতরাং কোন তলের ওপর শব্দতরঙ্গ পড়লে তার ওপর এক প্রত্যাবর্তী চাপ প্রযুক্ত হবে। কিন্তু এ-ছাড়াও চল-তরঙ্গমাত্রেই মাধ্যম এবং নিজের প্রকৃতি নিরপেক্ষভাবে আপতন তলের ওপরে এক নিয়ত চাপ প্রয়োগ করে। সেই চাপকে **বিকিরণ চাপ** বলে। সুতরাং আপতন তলের ওপর শব্দতরঙ্গও বিকিরণ চাপ প্রয়োগ করবে।

ম্যাক্সওয়েল তাঁর বিদ্যুচ্চুম্বকীয় তত্ত্বের বিশ্লেষণে প্রথম দেখান যে, আদর্শ প্রতিফলকের ওপর বিদ্যুচ্চুম্বকীয় তরঙ্গ যে লম্বচাপ প্রয়োগ করে, তার মান ঐ তলের ঠিক সামনে বিকিরিত শক্তির আয়তন-ঘনত্বের সমান। তাঁর এই সিদ্ধান্ত নিকল্‌স ও হাল, লিবিডিউ এবং পয়েন্টিং আলোকতরঙ্গের ক্ষেত্রে পরীক্ষা ক'রে সমর্থন করেছেন। লারমর গণনা ক'রে দেখেছেন যে, ম্যাক্সওয়েলের সিদ্ধান্ত তরঙ্গের প্রকৃতি ও মাধ্যম নিরপেক্ষ।

আমরা আদর্শ গ্যাসবাহিত শব্দতরঙ্গের ক্ষেত্রে শাব্দ-বিকিরণ-চাপের মান

বার করবো। কোন এক মুহূর্তে তার নিমেষ-চাপ P এবং অবিক্ষুব্ধ চাপ (P_0) হলে, সংজ্ঞানুযায়ী শাব্দ-চাপ

$$p = P - P_0$$

আদর্শ গ্যাসে শব্দ চলাকালে চাপ ও আয়তনের পরিবর্তন রুদ্ধতাপ। সুতরাং

$$P_0 V_0^{\gamma} = PV^{\gamma} = PV_0^{\gamma}\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{\gamma}$$

$$\therefore \quad P = P_0\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{-\gamma}$$

$$= P_0\left[1-\gamma\frac{\partial\xi}{\partial x}+\frac{\gamma(\gamma+1)}{\lfloor 2}\cdot\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^2-\cdots\right]$$

$$\therefore \quad p = P - P_0 = -\gamma P_0\left[\frac{\partial\xi}{\partial x}+\tfrac{1}{2}(\gamma+1)\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^2\right]$$

[উচ্চ ক্রমের রাশি বাদ দিয়ে]

$$= -c^2\rho_0\left[-\beta\xi_m \cos(\omega t-\beta x) + \tfrac{1}{2}(\gamma+1)\beta^2\xi_m^2\cos^2(\omega t-\beta x)\right]$$

$$= c^2\rho_0\,\beta\xi_m\cos(\omega t-\beta x) + \tfrac{1}{2}(\gamma+1)\,c^2\rho_0\,\beta^2\xi_m^2\cos^2(\omega t-\beta x) \quad (৬\text{-}১০.১)$$

এই ব্যঞ্জকের প্রথম পদ আমাদের পরিচিত শাব্দ-চাপ $p_m \cos(\omega t - \beta x)$ এবং এক পুরো চক্রে তার গড় মান শূন্য। দ্বিতীয় পদে $\cos^2$-রাশির গড় মান $\frac{1}{2}$;

$$\therefore \quad \overline{p_B} = \tfrac{1}{4}(\gamma+1)\,c^2\rho_0\beta^2\,\xi_m^2 = \tfrac{1}{2}(\gamma+1)\cdot\tfrac{1}{2}\frac{p_m^2}{\rho_0 c^2}$$

$$= \tfrac{1}{2}(\gamma+1)\overline{E} \quad (৬\text{-}১০.২)$$

মোট শাব্দ-চাপের এই অচর অংশ $\bar{p}_B$ দ্বিতীয় ক্রমের ক্ষুদ্র রাশি, কারণ সে স্বল্পবিস্তার ξ_m-এর বর্গের ওপর নির্ভরশীল। এই নিয়ত বা অচর চাপকে **র‍্যালে বিকিরণ-চাপ** বলা হয়। বলা বাহুল্য যে, বিকিরণ-চাপের মান সামান্যই। খুব জোরালো শব্দের বেলাতেও এর মান নগণ্য

(0.06 ডাইন/সেমি²)। আদর্শ গ্যাসে চাপ-আয়তনের পরিবর্তন সমোষ্ণ হলে, বয়েলের সূত্র প্রযোজ্য। তখন $\gamma=1$ এবং

$$\bar{p}_R=\bar{E} \qquad (৬\text{-}১০.৩)$$

এই ফল লারমরের এবং ম্যাক্সওয়েলের ফলের সঙ্গে অভিন্ন। শব্দের বিকিরণ-চাপের মান জানা থাকলে, তার তীব্রতা এবং কোন তলের শব্দ-শোষণাংক বার করা যায়।

৬-১১. সমতলীয় শব্দ-তরঙ্গের ক্ষীণীভবন :

এইজাতীয় শব্দ-তরঙ্গের ব্যাপ্তির আলোচনায় ধরা হয়েছে যে

(*i*) স্বনক থেকে যত দূরেই যাওয়া যাক না কেন, শব্দের তীব্রতা অক্ষুণ্ণ থাকে এবং (*ii*) তরঙ্গ কেবল একটিমাত্র দিকে (x-অক্ষ বরাবর) এগোতে থাকে, পাশের দিকে ছড়ায় না ; বাস্তবে দুটির কোনটিই ঘটে না। ব্যাপ্তির সঙ্গে নানা কারণে তরঙ্গশক্তির অপচয় হওয়ায় সমতলীয় তরঙ্গের স্পন্দনবিস্তার তথা শাব্দতীব্রতা কমতে থাকে। এই ঘটনাকে **তরঙ্গের ক্ষীণীভবন** বলে। এর কারণগুলি আমরা আলোচনা করবো।

তনুকরণের বা ক্ষীণীভবনের কারণগুলি মোটামুটি দুই শ্রেণীর—(ক) তরঙ্গ-ধর্ম, (খ) মাধ্যমধর্ম। বিবর্তন এবং বিক্ষেপণ দুটি তরঙ্গধর্ম আর মাধ্যমের সান্দ্রতা, তাপসঞ্চালনক্ষমতা এবং আণবিক শ্লথন ধর্মগুলি, তনুকরণ ঘটায়।

আদর্শ সমতলীয় তরঙ্গে শক্তি একমুখে যাওয়ার কথা—বাস্তবে এই-জাতীয় তরঙ্গে বিবর্তন ধর্মের দরুন অল্পবিস্তর শক্তি অন্যদিকে ছড়িয়ে পড়ে ; তরঙ্গদৈর্ঘ্য যত বড় এই কারণে শক্তির অপচয়ও তত বেশী। আবার তরঙ্গ-পথে তার দৈর্ঘ্যের তুলনায় ছোটখাটো বাধা থাকলে আপতিত শক্তির বিক্ষেপণ (scattering) ঘটে। এই কারণে অপচিত শক্তির পরিমাণ বিক্ষেপক-সংখ্যার উপর নির্ভর করে। এদের সম্পর্কে নবম অধ্যায়ে আলোচনা হবে।

প্রবাহী মাধ্যমের সান্দ্রতা আর তাপের পরিবহণ এবং বিকিরণক্ষমতাই শব্দতরঙ্গের তনুকরণ ঘটায়। সান্দ্রতার উৎপত্তি মাধ্যমের আন্তঃস্তর-ঘর্ষণে ; কাজেই স্পন্দনশক্তির কিছুটা তাপে রূপান্তরিত হয়ে শাব্দ-তীব্রতা কমায়।

শব্দতরঙ্গের ঘনীভবনে উষ্ণতা বাড়ে আর তনুভবনে কমে। তাহলে ঘনীভূত স্তর থেকে তনুভূত স্তরে খানিকটা তাপ পরিবাহিত এবং বিকিরিত হবে। এটা হলেই সংস্থার entropy বেড়ে যাবে, ফলে শক্তির অবক্ষয়

হবে। উষ্মগতিতত্ত্ব থেকে স্টোক্‌স দেখিয়েছেন যে—সংকোচন-প্রসারণ, হয় সমোষ্ণ, না হয় রুদ্ধতাপ হলেই [৬-৭(খ) অনুচ্ছেদ] অবক্ষয় এড়ানো সম্ভব। পরীক্ষালব্ধ ফল বলে যে, সংকোচন-প্রসারণ রুদ্ধতাপ ঘটনা। ল্যাপল্যাসের মতে সংকোচন-প্রসারণ এত দ্রুত হয় যে, তাপ-সঞ্চালনের সময় মেলে না, তাই ঘটনাটি রুদ্ধতাপ হয়। সম্প্রতি হার্জফিল্ড ও রাইস নামে দুই বিজ্ঞানী বলেছেন যে, সংকোচন-প্রসারণ ধীরগতি ব'লেই রুদ্ধতাপ অবস্থা বজায় থাকে। তাঁদের মতে, তাপ-পরিবহণের হার (i) দুই স্তরের মধ্যে উষ্ণতাভেদের আর (ii) তরঙ্গকম্পাংকের বর্গের (n^2) সমানুপাতে বাড়ে। সুতরাং সংকোচন-প্রসারণ দ্রুত হলে, অর্থাৎ স্তরের স্পন্দনহার বেশী হলে, তাপসঞ্চালন দ্রুতহারে হ'ত, তাতে শক্তির ক্ষয় এবং বিচ্ছুরণ বেশী হ'ত।

এবারে একে একে তরঙ্গের অবক্ষয় ধ্রুবক, সান্দ্রতা, তাপের পরিবহণ, বিকিরণ এবং আণবিক শ্লথনের ভূমিকাগুলির সংক্ষেপে গণিতীয় আলোচনা হোক।

ক. অবক্ষয় (Attenuation) ধ্রুবক : যেকোন একমাত্রা সমঞ্জস তরঙ্গে কণাসরণ

$$\xi = \xi_m e^{j\omega(t-x/c)} \text{ এবং } \partial^2\xi/\partial t^2 = c^2 . \partial^2\xi/\partial^2 x$$

এই দুই সমীকরণ দিয়ে প্রকাশ করা সম্ভব। শব্দতরঙ্গবাহী মাধ্যমে কোন বিন্দুতে শব্দ বা বাড়তি চাপ $p = Ks = -K(\partial\xi/\partial x)$ এবং δx বেধের স্তরের ওপর সক্রিয় প্রত্যানয়ক বল $(\partial p/\partial x)\,\delta x = -K\,(\partial^2\xi/\partial^2 x)\,\delta x$; এই বলের কিছু অংশ স্তরটিকে গতিশীল করে, বাকী অংশ খরচ হয় ঘর্ষণবাধা অতিক্রম করতে। মন্দিত দোলনের মতো এখানেও ঘর্ষণবল $r\dot{\xi}.\delta x$ ধরলে, স্তরের স্পন্দনের সমীকরণ দাঁড়াবে

$$\rho_0\left(\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}\right)\delta x = -r.\left(\frac{\partial\xi}{\partial t}\right)\delta x + K\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}.\,\delta x$$

এখানে ρ_0 স্তরের স্বভাবী ঘনত্ব। ξ-এর বদলে কণাবেগ u ব্যবহার করলে মন্দিত সমতলীয় তরঙ্গের অবকল সমীকরণ হবে

$$\rho_0\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + r\frac{\partial u}{\partial t} - K\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \qquad (৬\text{-}১১.১)$$

পরখ সমাধান হিসাবে $u = u_m e^{j\omega(t-x/a)}$ ধরলে, পাওয়া যাবে

$$\left(-\omega^2\rho_0 + j\omega r + \frac{K}{a^2}\omega^2\right)u = 0 \qquad (৬\text{-}১১.২)$$

$u \neq 0$ ব'লে, $\frac{1}{a^2} = \frac{\rho_0}{K} - j\frac{r}{\omega K} = \frac{1}{c^2} - j\frac{r}{\omega\rho_0 c^2} = \frac{1}{c^2}\left(1 - j\frac{r}{\omega\rho_0}\right)$

$$\therefore \quad \frac{1}{a} = \frac{1}{c}\left(1 - \frac{jr}{2\omega\rho_0}\right) \text{ [কারণ } r/\omega\rho_0 \text{ ছোট রাশি]} \quad (\text{৬-১১.৩})$$

$$\therefore \quad u = u_m e^{j\omega(t - x/a)} = u_m e^{j\omega(t - x/c + jrx/2\omega\rho_0 c)}$$

$$= u_m e^{-\alpha x} . e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (\text{৬-১১.৪})$$

এখানে অবক্ষয় ধ্রুবক $\alpha = r/2\rho_0 c$ আর $\beta = \omega/c$; মন্দিত দোলনের মতোই এখানেও স্তরের স্পন্দনবেগবিস্তার, $e^{-\alpha x}$ রাশির উপস্থিতিতে সূচকীয়ভাবে কমতে থাকবে। তবে মন্দিত দোলনে হ্রাস হয় সময়ের সঙ্গে, আর মন্দিত তরঙ্গগতিতে তা হবে দূরত্বের সঙ্গে। অনুরূপভাবেই স্তরের স্পন্দনবিস্তারও (ξ) দূরত্বের সঙ্গে সঙ্গে কমে।

খ. সান্দ্রতার প্রভাব : স্টোক্‌স আর র‍্যালের গণনানুসারে গ্যাসে তরঙ্গগতির অবকল সমীকরণ

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = K\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{4}{3}\eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 . \partial t} \quad (\text{৬-১১.৫})$$

এখানেও পরথ সমাধান হিসাবে $u = u_m exp\ j(\omega t - \beta x)$ ধরলে, $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{\omega^2}{c^2}u$ মেলে। ওপরের সমীকরণে এই মান বসালে পাবো,

$$\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = K\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{4}{3}\eta\frac{\omega^2}{c^2}. u\frac{\partial u}{\partial t}$$

বা $\rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + r\frac{\partial u}{\partial t} - K\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad [r = 4u\eta\omega^2/3c^2] \quad$ (৬-১১.৬)

আগের সমীকরণের সঙ্গে এ অভিন্ন ব'লে, সমাধান দাঁড়াবে

$$u = u_m exp\ (-\alpha_1 x).\ exp\ j\omega(t - x/a) \quad (\text{৬-১১.৭})$$

এবং $\alpha_1 = r/2c\rho_0 = \frac{\frac{4}{3}\eta\omega^2/c^2}{2c\rho_0} = \frac{2}{3}.\frac{\eta}{\rho_0}.\frac{\omega^2}{c^3} = \frac{2}{3}\nu.\frac{4\pi^2 n^2}{c^3}$

$$= \frac{8}{3}.\frac{\pi^2 \nu}{\lambda^2 . c} \quad (\text{৬-১১.৮})$$

এখানে η সান্দ্রতাংক এবং $\nu(=\eta/\rho)$ স্থিতি-সান্দ্রতাংক (Kinematic viscosity)। u-এর জায়গায় সরণবিস্তার ξ_m বসালে একই সম্পর্ক (৬-১১.৭)

আসবে। প্রাথমিক সরণবিস্তার $(\xi_m)_0$ আর x দূরত্বে তার মান $(\xi_m)_x$ ধরলে, পাবো

$$(\xi_m)_x = (\xi_m)_0 exp(-\alpha_1 x) = (\xi_m)_0 exp(-\alpha_1'/\lambda^2)x \quad (৬\text{-}১১.৯)$$

অর্থাৎ $\alpha_1' = 8\pi^2 v/3c$; ধ্রুবকগুলির জানা মান বসালে $15°C$ উষ্ণতায় বায়ুতে $\alpha_1' = 1.13 \times 10^{-4}$; কাজেই সাধারণভাবে সান্দ্রতাজনিত অবক্ষয় অল্পই, তবে তরঙ্গদৈর্ঘ্য কমলে তা বাড়ে। নলের মধ্যে শব্দ চললে, দেওয়ালে ঘর্ষণের দরুন সান্দ্রতা–অবক্ষয় অনেক বেশী হয়।

গ. তাপ-পরিবহণ: উপরোক্ত বিজ্ঞানীদের গণনামতে ৬-১১.৯ আকারের সিদ্ধান্ত এখানেও কার্যকর। অর্থাৎ

$$(\xi_m)_x = (\xi_m)_0 e^{-\alpha_2 x} \text{ এবং } \alpha_2 = \frac{\omega^2 k'}{c^3} \cdot \frac{\gamma - 1}{\gamma}$$

এখানে $k' = 1.78v$; রাশিটিকে উষ্ম (thermometric)-পরিবাহিতাংক বলে। এখন সান্দ্রতা আর তাপপরিবহণজনিত অবক্ষয়-গুণাংক তুলনা করলে $\alpha_1/\alpha_2 = 0.4$ দাঁড়াবে। দুটিকে যুক্ত ক'রে লেখা যায়

$$(\xi_m)_x = (\xi_m)_0 exp\left[-(\alpha_1' + \alpha_2')x/\lambda^2\right]$$

যথাযথ মান বসালে দেখা যায় যে, এই দুই কারণ মিলিয়ে অবক্ষয়মাত্রা সামান্যই দাঁড়াবে।

স্টোক্‌সের মতে, বিকিরণের বেলায় অবক্ষয়-ধ্রুবক $\alpha_3' = \frac{v-1}{4v} \cdot \frac{q}{c}$; এই মান আরও অনেক ছোট। এখানে কোন মুহূর্তে দুই স্তরের মধ্যে উষ্ণতাভেদ θ_0 এবং t সেকেণ্ড পরে θ_t হলে, $q = \frac{\ln(\theta_0/\theta_t)}{t}$

ঘ. আণবিক শ্লথন: মাধ্যমে চলাকালে শব্দতরঙ্গ অণুদের স্পন্দিত করে, ফলে তারা উত্তপ্ত হয়। বহু-পরমাণু গ্যাসে এইরকম স্পন্দমান অণু আর আশপাশের স্থির অণুদের মধ্যে তাপবিনিময় হয়ে সমোষ্ণতা প্রতিষ্ঠিত হতে খানিকটা সময় লাগে ; তাকে **শ্লথন-কাল** বলে। উষ্ণতার দরুন অণুগুলির রৈখিক গতি থাকেই। শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় তাদের ওপর স্পন্দনগতিও আরোপিত হয়। এই দুই গতিশক্তির বিনিময়, স্তরের চাপ-পরিবর্তনের সঙ্গে তাল রেখে

চলতে পারে না। কাজেই রুদ্ধতাপ উষ্ণতাভেদের পরিবর্তনের সঙ্গে আণবিক গতি সমলয়ে (synchronous) হয় না। শাব্দ স্পন্দন আর গ্লথন সমকাল (isochronous) না হলে চাপভেদ আর উষ্ণতাভেদের মধ্যে কাল-বিলম্ব (time lag) এসে যায়। সুতরাং মাধ্যমে খানিকটা শক্তি আটকে পড়ে এবং তরঙ্গশক্তির অবক্ষয় ঘটে। তবে তত্ত্ব ও পরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত হয় যে, এই প্রভাব উচ্চ কম্পাংকেই কার্যকরী।

প্রশ্নমালা

১। শব্দ যে তরঙ্গ তা প্রতিষ্ঠা কর। শব্দতরঙ্গ কি ধরনের তরঙ্গ? তার কোন চাক্ষুষ প্রমাণ দিতে পার? এই তরঙ্গে মাধ্যমের কোন্ প্রাচল প্রসারলাভ করছে ব'লে তুমি মনে কর? সেই প্রাচলভেদের একটি গণিতীয় ব্যঞ্জক উপস্থাপিত কর।

২। প্রবাহী মাধ্যমে শব্দবেগের গণিতীয় ব্যঞ্জক প্রতিষ্ঠা কর। যে রাশিটি পেলে সেটি কোন্ তরঙ্গরূপের বেগ নির্দেশ করে? এই ব্যুৎপত্তি কি কি অঙ্গীকার-সাপেক্ষ? সেগুলি কতদূর গ্রহণযোগ্য?

৩। শাব্দক্ষেত্র বলতে কি বোঝ, বিস্তারিত আলোচনা কর। শাব্দক্ষেত্রে সঞ্চিত শক্তির মান নির্ণয় কর এবং তার বৈশিষ্ট্য আলোচনা কর। শাব্দ-তীব্রতা ও শাব্দ-ক্ষমতা কাকে বলে? তাদের মান নির্ণয় কর।

৪। গ্যাস-মাধ্যমে শাব্দবেগের গণিতীয় ব্যঞ্জক প্রতিষ্ঠা কর। এই ব্যুৎপত্তি কি কি সর্তাধীন? তারা কতদূর প্রযোজ্য?

এই শাব্দবেগের মান মাধ্যম এবং স্বনকের কি কি বৈশিষ্ট্যের দ্বারা এবং কতখানি প্রভাবিত হয়? এই মান আবার এদের কোন্ কোন্ ধর্ম-নিরপেক্ষ?

৫। কোন তলের ওপর শব্দতরঙ্গ পড়লে যে চাপের উৎপত্তি হয় তার মান নির্ণয় কর। এই রাশিটির দুটি অংশ—একটি চর, অপরটি অচর। তাদের নাম কি এবং তুলনামূলক ক্রমই বা কি?

৬। সমতলীয় শব্দ প্রসারিত হওয়ার কালে তার সরণবিস্তার কি কি কারণে কমতে থাকে তার সম্বন্ধে সংক্ষিপ্ত আলোচনা কর।

৭

ত্রিমাত্রিক ও জটিল তরঙ্গমালা

(Three-dimensional and Complex Waves)

৭-১. সূচনা :

আগের দুই অধ্যায়ে সমতলীয় তরঙ্গ আমাদের আলোচ্য বিষয় ছিল। একটা বিস্তৃত সমতল তার ক্ষেত্রতলের লম্ব বরাবর স্পন্দিত হতে থাকলে কার্যত সমতলীয় তরঙ্গের [5.9(b) চিত্র] উৎপত্তি হয়। উৎস থেকে অনেক দূরে যেকোন তরঙ্গকেই সমতলীয় ধরা যায়। এরা একদেশীয় বা একমাত্রিক অর্থাৎ কেবল একদিকে এগোয়—পাশে ছড়ায় না আর তাদের স্পন্দনবিস্তার অক্ষুণ্ণ থাকে। শেষ অনুচ্ছেদে (৬-১১) আমরা দেখলাম দুটি সর্তের কোনটিই বাস্তব নয়। আসলে, সমতলীয় সমঞ্জস তরঙ্গ একটা সরলীকৃত এবং প্রায় অবাস্তব কল্পনামাত্র। বাস্তব উৎসমাত্রেই অপসারী তরঙ্গের [5.9(a) চিত্র] উৎপত্তি ঘটায়—তারা ত্রিদেশ বা **ত্রিমাত্রিক**। সাধারণভাবে তারা প্রকৃতিতে জটিলও বটে। এইজাতীয় তরঙ্গের মধ্যে গোলীয় তরঙ্গ, প্রশস্তবিস্তার, দ্রুতপ্রাসজ এবং ভূকম্প-তরঙ্গ এই অধ্যায়ের বিষয়বস্তু।

যেকোন মাধ্যমে বাস্তব তরঙ্গমাত্রেই অপসারী। উৎস আকারে ছোট এবং মাধ্যম সমসারক হলে তরঙ্গ **গোলীয়** আকারের হয়। উৎস থেকে দূরত্ব বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে গোলীয় তরঙ্গে শাব্দ চাপ এবং শাব্দ তীব্রতা দুই-ই কমতে থাকে। এইজাতীয় তরঙ্গ সরলতম ত্রিমাত্রা তরঙ্গ।

গোলীয় তরঙ্গের আলোচনা স্বল্পবিস্তারেই সীমিত থাকবে। কিন্তু আজকাল **অতিপ্রবল শব্দ** মোটেই বিরল নয়, বরং তারা পরিবেশবিজ্ঞানীদের, চিকিৎসক এবং সমাজবিজ্ঞানীদের কাছে বিশেষ শিরঃপীড়ার কারণ হয়ে উঠেছে। এদের ক্ষেত্রে মাধ্যমের সংকোচন তথা পীড়ন এত বেড়ে যায় যে, তখন স্পন্দন আর সরল দোলন থাকে না (৩-১৫ দেখ), হুকের সূত্র আর কার্যকর হয় না। প্রচণ্ড বিস্ফোরণ এইজাতীয় শব্দতরঙ্গের নিদর্শন। সেক্ষেত্রে তরঙ্গের প্রাথমিক বেগ, রূপ বা ছাঁদ, শাব্দ আচরণ সবই অস্বাভাবিক থাকে। উৎস থেকে বেশ কিছু দূরে পৌঁছে এরা সবাই স্বাভাবিক স্বল্পবিস্তার তরঙ্গের রূপ পেয়ে যায়।

বৈজ্ঞানিক অগ্রগতির আধুনিক আর এক নমুনা শব্দোত্তর (supersonic) বেগ। রকেট, জেট-বিমান, আন্তর্মহাদেশীয় ক্ষেপণাস্ত্র (ICBM) বা মহাকাশযান, শব্দের চেয়ে বেশী বেগে চলে। শক্তিশালী রাইফেলের বুলেট বা কামানের গোলাও তাই। এদের চলার ফলে বায়ুতে যে আলোড়নের সৃষ্টি হয় তার ক্রিয়াকলাপও অস্বাভাবিক। এই আলোড়ন-তরঙ্গকে **দ্রুতপ্রাসঙ্গ** শব্দ বলা চলে। মানুষের দেহে, মনে, জীবনযাত্রায় এদের উপস্থিতি খুবই ক্ষতিকারক এবং অস্বস্তিকর। সাম্প্রতিককালে ইঙ্গ-ফরাসী দ্রুতগামী Concorde বিমান নিয়ে আন্তর্জাতিক বিতর্ক, এই সচেতনতার নির্দেশক।

শব্দ না হলেও **ভূকম্পতরঙ্গ** তাদের মতোই স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ। এরা কেবলমাত্র কঠিনমাধ্যমবাহিত হওয়ায় তাদের বৈচিত্র্য ও জটিলতা অনেক বেশী। ১৯৭৫-৭৬ সনে পৃথিবীর নানা জায়গায় (চীন, তুরস্ক, ফিলিপাইন, মধ্য আমেরিকা) অনেকগুলি বিধ্বংসী ভূমিকম্প ও অগ্ন্যুৎপাত —এ ব্যাপারে সাধারণ মানুষের দৃষ্টি আকৃষ্ট করেছে। আজকাল খনিজ-পদার্থ-সন্ধানে বা ভূ-সমীক্ষণে, কৃত্রিম ভূকম্প-তরঙ্গের প্রয়োগ এই জিজ্ঞাসাকে আরও প্রাসঙ্গিক ক'রে তুলেছে। আমরা এ-সম্পর্কে সামান্য প্রাথমিক আলোচনা করবো।

৭-২. প্রশস্ত-বিস্তার তরঙ্গ :

স্বল্পবিস্তার তরঙ্গই এপর্যন্ত আমাদের বিষয়বস্তু ছিল। তারা যখন মাধ্যমের মধ্য দিয়ে যায় তখন মাধ্যমের ঘনবিকৃতি গুণাংক K অচর রাশি ধরা যায়। কিন্তু প্রবল বিস্ফোরণ, কামানের প্রচণ্ড গর্জন, জেট-বিমানের শব্দ, সশব্দ বজ্রপাত, কোনটিতেই সৃষ্ট শব্দতরঙ্গকে স্বল্পবিস্তার বলা যায় না—এসব ক্ষেত্রে তরঙ্গবিস্তার প্রশস্ত বা বিপুল। বিপুল শব্দতরঙ্গের (*i*) বেগ সাধারণ স্বনবেগের চেয়ে অনেক বেশী, (*ii*) ঘনীভূত স্তরে কণাবেগ তনুভূত স্তরের সাপেক্ষে বেশী, (*iii*) তরঙ্গরূপ, ব্যাপ্তির সঙ্গে বদলাতে থাকে। কোনটিই স্বাভাবিক স্বনতরঙ্গের আচরণ নয়। এইজাতীয় শব্দ-তরঙ্গের আলোচনাকে **বিপুল শাব্দতত্ত্ব** (macrosonics) বলে।

ক. বিপুল তরঙ্গে আয়তন-বিকার-গুণাংক : বায়ুমাধ্যমে বিকৃতি অল্প হলে তবেই এই রাশিটি ($K_s = \gamma P$) অচর ; বিকৃতি বেশি হলে, এই

সম্পর্কটি আর খাটে না। সংজ্ঞা অনুসারে মাধ্যমের ঘন-বিকার-গুণাংক এবং ভর-ঘনত্ব যথাক্রমে

$$K = -\frac{dP}{dV/V} \quad \text{এবং} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

ভর m অচর ব'লে অবকলনে পাই $\qquad \rho.\, dV + V.d\rho = 0$

$$\text{সুতরাং} \quad \rho\, \frac{dV}{dP} + V.\frac{d\rho}{dP} = 0 \quad \text{বা} \quad \frac{dV}{dP} = -\frac{V}{\rho}.\frac{d\rho}{dP}$$

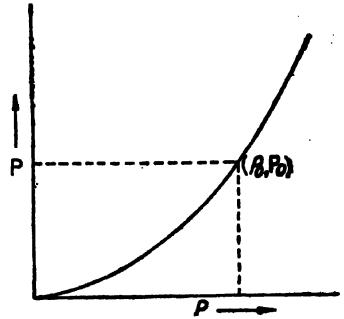
$$\frac{dP}{d\rho} = -\frac{V}{\rho}.\frac{dP}{dV} = \frac{1}{\rho}.\frac{dP}{-dV/V} = K/\rho \qquad (৭\text{-}২.১)$$

কাজেই তরঙ্গবেগ $c' = \sqrt{K/\rho} = \sqrt{dP/d\rho}$ (৭-২.২)

শব্দতরঙ্গে চাপ ও আয়তনের পরিবর্তন রুদ্ধতাপ ঘটনা ; তাই সেক্ষেত্রে

$$PV^{\gamma} = A \text{ (ধ্রুবক) অর্থাৎ } P = A.\, (\rho/m)^{\gamma} = A'\rho^{\gamma} \qquad (৭\text{-}২.৩)$$

$$\therefore \quad \frac{dP}{d\rho} = \gamma A'\rho^{\gamma-1} = (c')^2 \qquad (৭\text{-}২.৪)$$

অর্থাৎ ঘনত্ব বাড়লে $dP/d\rho$ রাশিটি বাড়বে, কাজেই শব্দবেগও বাড়বে। বয়েলের সূত্রানুসারে চাপ ও ঘনত্ব সমানুপাতিক, সুতরাং তাদের মধ্যে সম্পর্ক রৈখিক, কিন্তু 7.1 চিত্রে দেখা যাচ্ছে, তা নয়। চাপ যখন বেশী তখন P-ρ বক্রের নতি ($dP/d\rho$), কম চাপের তুলনায় বেশী, কাজেই K চররাশি, বেগও তাই হবে। ঘনীভবন দ্রুততর এবং তনুভবন মন্থরতর বেগে ব্যাপ্ত হবে।

চিত্র 7.1—বিপুলবিস্তারে চাপ ও ঘনত্বের সম্পর্ক

খ. বিপুল তরঙ্গের বেগ : K চররাশি হলে তরঙ্গব্যাপ্তির গণিতীয় বিশ্লেষণ দুরূহ হয়। তবে তার মোটামুটি বৈশিষ্ট্যগুলি প্রতিপন্ন করা যায়। এই প্রতিপাদন মোটামুটি ৬-৩ অনুচ্ছেদের মতোই, খালি সংকোচন $s \ll 1$ ধরা হচ্ছে না। সেখান থেকে জানি

$$\rho_0\, \partial x.\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial x}.\,\partial x \qquad \text{অর্থাৎ} \quad \ddot{\xi} = -\frac{1}{\rho_0}.\frac{\partial P}{\partial x}$$

বায়ুর চাপ-আয়তন ভেদ, রুদ্ধতাপ ; স্বভাবী চাপ P_0 ধরলে, পাব

$$\frac{P}{P_0}=\left(\frac{V_0}{V}\right)^{\gamma}=\left[\frac{V_0}{V_0(1+\partial\xi/\partial x)}\right]=\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{-\gamma}$$

$$\therefore \quad P=P_0\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{-\gamma} \qquad (৭\text{-}২.৫)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial P}{\partial x}=-\gamma P_0\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{-(\gamma+1)}\cdot\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}$$

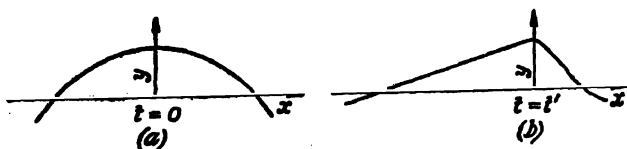
$$\therefore \quad \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=-\frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\partial P}{\partial x}=\frac{\gamma P_0}{\rho_0}\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)^{-(\gamma+1)}\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=c^2(1-s)^{-(\gamma+1)}\cdot\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} \qquad (৭\text{-}২.৬)$$

সুতরাং তরঙ্গগতির অবকল সমীকরণের সঙ্গে তুলনা ক'রে বিপুল তরঙ্গের বেগ দাঁড়াচ্ছে

$$c'=c/(1-s)^{\frac{1}{2}(\gamma+1)} \qquad (৭\text{-}২.৭)$$

গ. তরঙ্গ-ছাঁচের পরিবর্তন ঃ ৭-২.৭ সমীকরণ থেকে বোঝা যাচ্ছে যে, বিপুল তরঙ্গের বেগ স্বাভাবিক শব্দতরঙ্গবেগের তুলনায় অনেক বেশী, কারণ অনেক সময়েই s প্রায় একের সমান। আবার তরঙ্গের ভিন্ন ভিন্ন অংশে চাপসাপেক্ষে ঘনত্বভেদ $dP/d\rho$ আলাদা হওয়ায়, ৭-২.৪ সমীকরণ অনুযায়ী তাদের বেগ আলাদা আলাদা হবে। স্পষ্টতই ঘনীভূত অংশে এই রাশির মান তনূভূত অংশের চেয়ে বেশী ; সুতরাং ঘনীভবন ক্রমশই তনূভবনের তুলনায় এগিয়ে যেতে থাকে। তাতে তরঙ্গের ছাঁচ বদলে যেতে থাকবে।

বিস্তার বেশী হলে সচল তরঙ্গের ছাঁচ বা আকার যে ক্রমেই বদলে যায়,

চিত্র 7.2—তরঙ্গ-ছাঁচের পরিবর্তন

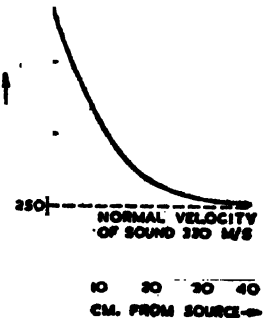
তার চাক্ষুষ উদাহরণ সমুদ্রতীরে গেলেই পাবে। উপকূলের ঢাল যদি অল্প হয় তবে দেখা যায় যে আগুয়ান ঢেউগুলির শীর্ষ ক্রমশঃ এগোতে থাকে এবং তরঙ্গমুখ ক্রমশঃ খাড়া হতে থাকে [7.2(b) চিত্র] ; শেষ পর্যন্ত শীর্ষ ঢেউ-এর ওপর দিয়ে গড়িয়ে পড়ে এবং ঢেউ ভেঙে যায়। তরঙ্গের শীর্ষ তরঙ্গপাদের

তুলনায় দ্রুততর চলে ব'লেই ঢেউ-এর আকারে এইরকম ক্রমাবিবর্তন ঘটে। শীর্ষে চাপ বেশী, পাদে কম, ফলে ওপরে উষ্ণতা তথা বেগ বেশী, নীচে কম; তা ছাড়াও দুই অংশে কণার সরণ বিপরীতমুখী। এতগুলি কারণেই ঢেউ-এর চেহারা বদলায়। জোরে চেঁচালে লাউডস্পীকারে যে বিকৃত শব্দ বেরোয় তার কারণও এই। তবে বিকৃতি সমানে চলছেই এমন হতে পারে না; কারণ সান্দ্রতা ও তাপসঞ্চালনজনিত শক্তির অবক্ষয় এবং তরঙ্গের অপসারিতা, আকারবিকৃতির প্রবণতাকে নিয়ন্ত্রিত করে এবং তরঙ্গ-ছাঁচের নির্দিষ্ট স্থায়ী আকার আনে।

ঘ. বিপুল তরঙ্গবেগ নিয়ে পরীক্ষা-নিরীক্ষা ঃ রেণো নলের মধ্যে শব্দবেগ নিয়ে পরীক্ষাকালে (১৮৬২) প্রথম লক্ষ্য করেন যে, জোরালো শব্দের বেগ স্বাভাবিকের তুলনায় বেশী। তাঁর পরীক্ষালব্ধ ফল বিশ্লেষণ ক'রে রীম্যান তীব্র শব্দের (c') এবং স্বাভাবিক শব্দের বেগের (c) মধ্যে একটা সম্পর্ক বের করেন

$$c'/c=(1+\alpha/x^2)^{\frac{1}{2}}$$

এখানে, উৎস থেকে x দূরত্বে ক্ষণ-শব্দের (pulse) পরীক্ষায় নির্ণীত বেগ c', আর α ঐ ক্ষণ-শব্দের ঘনীভূত অংশের প্রস্থ-নির্ভর এক অচর রাশি। দুই বেগের মধ্যে তফাৎ বেশী নয়, প্রায় 0.3% এর মতো। এই থেকে দেখা যাচ্ছে যে, উৎস থেকে বেশ খানিকটা দূরেই ঘাত-তরঙ্গের বেগ স্বাভাবিক হয়ে যায়।

যুক্তরাষ্ট্রের সমুদ্রতীরে প্রতিরক্ষা-বিভাগের রাক্ষুসে কামান দাগার সময় মিলার লক্ষ্য করেছিলেন (১৯৩৪) যে, কামানের কাছাকাছি, শব্দবেগ অস্বাভাবিক রকম বেশী। তরঙ্গঘাতের ছবি তুলে পেম্যান, রবিনসন ও সেফার্ড দেখেছেন যে 40 সেমি-র মধ্যে শব্দের বেগ $4c$ থেকে c-তে নেমে এসেছে। অতি তীব্র বিদ্যুৎক্ষরণ-জাত শব্দের বেগ উৎস থেকে 3.2 মিমি দূরে 660 মি/সে থেকে 18 মি দূরে 380 মি/সে হয়ে যেতে দেখা গেছে। 7.3 চিত্রে উৎস থেকে দূরত্বের সঙ্গে বেগের সম্পর্ক দেখানো হয়েছে।

চিত্র 7.3—উৎস-দূরত্বের সঙ্গে শব্দবেগের সম্পর্ক

মনে রাখা দরকার, বিপুল বিস্তার আর প্রচণ্ড সংকোচন এক জিনিস নয়।

অল্প কম্পাংকে যে বিস্তার অল্প, অনেক বেশী কম্পাংকে সেটিই বিপুল ; যেমন 10^{-4} সেমি বিস্তার, 10^{2} হার্ৎজ কম্পাংকে স্বল্প কিন্তু 10^{+6} কম্পাংকে বিপুল। তফাৎটা আসলে কণাবেগ u তথা সংকোচন s-এর ওপর নির্ভর করে। এই দুয়ের ক্ষেত্রে চরমবেগ $u_m(=2\pi na)$ যথাক্রমে 628×10^{-4} সেমি/সে এবং 628 সেমি/সে ; আর চরম সংকোচন $s_m(=u_m/c)$ যথাক্রমে $1{\cdot}9\times10^{-6}$ এবং 1.9×10^{-2} ; অতএব নিম্ন কম্পাংকে সংকোচন সামান্য, সুতরাং শব্দবেগ স্বাভাবিক ; উচ্চ কম্পাংকে সংকোচন অনেক বেশী, বেগ তাই অস্বাভাবিক।

৭-৩. অভিঘাত বা Shock-তরঙ্গ :

বিপুল তরঙ্গে ঘনীভবন তনুভবনের তুলনায় দ্রুততর চলে এবং তাতে তরঙ্গছাঁচ বদলাতে (চিত্র 7.2) থাকে। তরঙ্গমুখ শেষ পর্যন্ত খুব খাড়া হয়ে গিয়ে [7.2(b) চিত্র] দন্তুর (saw-tooth) আকার নিলে, তাকে **অভিঘাত** বা শক্-তরঙ্গ বলে। সহসা প্রবল বজ্রপাতের শব্দ, চাবুক বা বেতের সপাং শব্দ, রাইফেল-বুলেটের বা কাঠের কোন জিনিস চাড় দিয়ে হঠাৎ ভাঙলে চড়াক্ ক'রে যে শব্দ হয়,—এরা শক্-তরঙ্গের সাধারণ উদাহরণ। শক্তিশালী বিস্ফোরণ বা অন্য কোন কারণে প্রবাহী মাধ্যমে অতি দ্রুত ঘনীভবন ঘটলে এইজাতীয় তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। শব্দোত্তর বেগে বায়ুর মধ্যে কোন প্রাস (projectile) ছুটলে তার পেছনে যে পশ্চাৎতরঙ্গ গজায়, তাও শক্-তরঙ্গের সাধারণ উদাহরণ, কারণ এর আলোকচিত্র (7.9a) নেওয়া সম্ভব। এই পশ্চাৎতরঙ্গে তরঙ্গমুখের আড়াআড়ি দিকে ব্যাপ্তিবেগ, শান্ত মাধ্যমে ব্যাপ্তি-বেগের তুলনায় অনেক বেশী হয়।

স্বল্পবিস্তার তরঙ্গে দশাবেগ কণাবেগের তুলনায় অনেক বেশী ($c \gg u$), বিপুল তরঙ্গে তারা তুলনীয় আর শক্-তরঙ্গে $c < u$; দুই বেগের (u/c) অনুপাতকে **ম্যাক্-সংখ্যা** বলে। আদর্শ গ্যাসে শক্-তরঙ্গ চললে—চাপ, ঘনত্ব, উষ্ণতা সবই বাড়ে, কিন্তু ম্যাক্-সংখ্যা কমে। শক্-তরঙ্গ খুব প্রবল হলে γ-র মানে অনেক বদল হয়, ফলে গ্যাসের অণুতে বিষঙ্গ (dissociation) এবং আয়নীভবন ঘটে। 2700°C এবং 4700°C উষ্ণতায় বায়ুতে এই দুই ঘটনা হতে দেখা গেছে।

গণিতীয় বিশ্লেষণ (Rankine-Hugoniot Eq.) : আদর্শ শক্-তরঙ্গে চাপ, ঘনত্ব ও কণাবেগে চিহ্নিত অসন্ততি আছে ধরা হয়। তাই

তরঙ্গব্যাপ্তির অবকল সমীকরণ এখানে অচল এবং নানা সংরক্ষণ-নীতি থেকে ব্যুৎপন্ন কয়েকটি আন্তর (difference)-সমীকরণ ব্যবহার করা হয়।

7.4 চিত্রে একক প্রস্থচ্ছেদের এক নলের অংশ দেখানো হয়েছে—তার মধ্যে একটি অভিঘাত (shock-pulse) AB ডানদিকে এগোচ্ছে। তার ডাইনে বাঁয়ে যথাক্রমে উচ্চ ও নিম্নচাপ অঞ্চল এবং সেখানে p_1, ρ_1, u_1 এবং p_2, ρ_2, u_2 যথাক্রমে দুই দফা পৃথক্ অচর রাশি। এখন সুবিধার খাতিরে AB স্থির এবং মাধ্যম সচল ধরলে, ভরের সংরক্ষণ সূত্র থেকে বলতে পারি যে AB-তে যতখানি ভর ঢুকছে ততখানিই বেরিয়ে যাচ্ছে, অর্থাৎ

চিত্র 7.4—অভিঘাতে মাধ্যম-মধ্যে অসন্ততি

$$m = \rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$$

এখন সময় সাপেক্ষে ভরবেগের পরিবর্তনের হার

$$mu_1 - mu_2 = \rho_1 u_1^2 - \rho_2 u_2^2$$

এখন AB স্তরের দুই প্রান্তের চাপভেদ $(p_2 - p_1)$ তার ওপর সক্রিয় বল; কাজেই নিউটনের দ্বিতীয় সূত্র থেকে

$$p_2 - p_1 = \rho_1 u_1^2 - \rho_2 u_2^2 \quad \text{বা} \quad p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2 \tag{৭-৩.১}$$

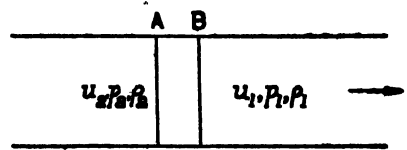
সুতরাং AB অংশের উপরে প্রতি সেকেণ্ডে $(p_1 u_1 - p_2 u_2)$ [কারণ কাজ/সময় = বল × বেগ] পরিমাণ কাজ হবে। উষ্মগতিতত্ত্ব অনুসারে এই কাজ, মাধ্যমের গতিশক্তির এবং তার আভ্যন্তরীণ শক্তির পরিবর্তনের সময়হারের সমান; অর্থাৎ

$$p_1 u_1 - p_2 u_2 = \tfrac{1}{2}\,(\rho_1 u_1 u_1^2 - \rho_2 u_2 u_2^2) + \rho_1 u_1 . \Delta\varepsilon$$

$$= \rho_1 u_1 \left[\tfrac{1}{2}(u_1^2 - u_2^2) + \Delta\varepsilon\right] \tag{৭-৩.২}$$

$(\because$ প্রবাহী স্তরের ভর $\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2)$

$\Delta\varepsilon$ = মাধ্যমের একক ভরের আভ্যন্তরীণ শক্তির প্রতি সেকেণ্ডে পরিবর্তন।
৭-৩.১ এবং ৭-৩.২ সমীকরণ থেকে

$$u_1 = \left[\left(\frac{p_2 - p_1}{\rho_2 - \rho_1}\right) . \frac{\rho_2}{\rho_1}\right]^{1/2} \text{ এবং } u_2 = \left[\left(\frac{p_2 - p_1}{\rho_2 - \rho_1}\right) . \frac{\rho_1}{\rho_2}\right]^{1/2} \tag{৭-৩.৩}$$

তাহলে $u_1 - u_2 = \sqrt{(p_2 - p_1)\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}\right)}$ (৭-৩.৪)

যদি $p_1 \geqslant (p_2 - p_1)$ এবং $\rho_1 \geqslant (\rho_2 - \rho_1)$ হয়, তবে

$$u_1 = u_2 = \sqrt{\Delta\varepsilon / \Delta\rho} \qquad (৭\text{-}৩.৫)$$

অর্থাৎ AB-র দুই ধারে চাপের এবং ঘনত্বের তফাৎ সামান্য হলে, দু'দিকে কণাবেগের মান সমান হয়ে যাবে। যেকোন প্রবাহী মাধ্যমেই সিদ্ধান্তগুলি প্রযোজ্য। এখানে u_1 শকতরঙ্গের বেগের সমান এবং $(u_1 - u_2)$ অভিঘাতের ঠিক অনুবর্তী ভরের গতিবেগ। এই দুই সমীকরণ ৭-৩.৩ এবং ৭-৩.৫ যথাক্রমে Rankine-Hugoniot-এর প্রথম ও দ্বিতীয় সমীকরণ নামে পরিচিত। এখন ৭-৩.২ থেকে

$$\Delta\varepsilon = \tfrac{1}{2}(u_1^2 - u_2^2) + \frac{p_1 u_1 - p_2 u_2}{\rho_1 u_1}$$

এখন $\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2$ এবং (৭-৩.১) থেকে $p_2 - p_1 = \rho_1 u_1^2 - \rho_2 u_2^2$ হওয়ায়

$$p_2 - p_1 = \rho_2 u_2 (u_1 - u_2) \text{ বা } u_1 - u_2 = (p_2 - p_1)/\rho_2 u_2$$

সুতরাং $\Delta\varepsilon = \tfrac{1}{2}(p_1 - p_2)\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right) + \left(\frac{p_2}{\rho_2} - \frac{p_1}{\rho_1}\right)$

$$= \tfrac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_2 - V_1) \qquad (৭\text{-}৩.৬)$$

এটি Rankine-Hugoniot-এর তৃতীয় সমীকরণ।

অভিঘাত-তরঙ্গে সংকোচন অনুপাত এবং ম্যাক-সংখ্যা : বায়ুকে আদর্শ গ্যাস ধরলে এবং চাপ-আয়তনের পরিবর্তন রুদ্ধতাপ হলে উষ্মগতি-তত্ত্বের প্রথম সূত্র থেকে পাই

$$\delta Q = \Delta\varepsilon + p.\delta V = 0$$

$$\therefore \quad \varepsilon = -\int p.dV = pV/(\gamma - 1)$$

$$\therefore \quad \Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \frac{1}{\gamma - 1}(p_1 V_1 - p_2 V_2)$$

আবার ৭-৩.৬ থেকে, $\Delta\varepsilon = \tfrac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_2 - V_1)$

(i) **সংকোচন-অনুপাত :** $\triangle\varepsilon$-র এই দুই মান থেকে পাওয়া যাবে—

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{\rho_2}{\rho_1}=\frac{p_2(\gamma+1)+p_1(\gamma-1)}{p_1(\gamma+1)+p_2(\gamma-1)}=\frac{(\gamma-1)p_1/p_2+(\gamma+1)}{(\gamma+1)p_1/p_2+(\gamma-1)} \tag{৭-৩.৭}$$

শক্-চাপ খুব বেশী হলে, p_1/p_2 অসীম মানের কাছাকাছি যায়। তখন সংকোচন অনুপাত দাঁড়ায় $\frac{V_1}{V_2}=\frac{\gamma-1}{\gamma+1}$ (৭-৩·৮)

তাহলে সাধারণ উচ্চ চাপের ক্ষেত্রে $\frac{V_1}{V_2}<\frac{\gamma-1}{\gamma+1}$ এবং দ্বিপারমাণবিক গ্যাসের $(\gamma=1.4)$ বেলায় সংকোচন-অনুপাত কখনই বেশী হয় না, মাধ্যমের আয়তন-হ্রাস 1/6-এর বেশী হতে পারে না।

(ii) **অভিঘাত-প্রাবল্য (Shock strength) :** p_2/p_1 অনুপাত দিয়ে এই রাশিটি নির্দিষ্ট করা হয়। ৭-৩.৭ সমীকরণ থেকে দেখানো যায়

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{V_1}{V_2}=\frac{\rho_2(\gamma+1)-\rho_1(\gamma-1)}{\rho_1(\gamma+1)-\rho_2(\gamma-1)} \tag{৭-৩.৯}$$

(iii) **উষ্ণতাভেদ :** অভিঘাতের ক্রিয়ায় মাধ্যমের উষ্ণতা অনুপাত

$$\frac{T_2}{T_1}=\frac{p_2/\rho_2}{p_1/\rho_1}=\frac{p_2\rho_1}{p_1\rho_2} \tag{৭-৩.১০}$$

অর্থাৎ শকের ক্রিয়ায় উষ্ণতাবৃদ্ধি চাপবৃদ্ধির সমানুপাতিক, অথচ রুদ্ধতাপ ঘনীভবনে $(T_2/T_1)=(p_2/p_1)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$; আবার

$$T_2/T_1=\frac{p_2/\rho_2}{p_1/\rho_1}=\frac{\gamma p_2/\rho_2}{\gamma p_1/\rho_1}=\frac{c_2^2}{c_1^2} \tag{৭-৩.১১}$$

সুতরাং শক্-তরঙ্গে গতিবৃদ্ধি, উষ্ণতাবৃদ্ধির বর্গমূলের সমানুপাতিক।

(iv) **ম্যাক-সংখ্যায়** অনেক সময়ে ওপরের রাশিগুলি প্রকাশ করা দরকার। কণাবেগ u এবং তরঙ্গবেগের (c) অনুপাত ম্যাক-সংখ্যা। ধরা যাক, $M_1=u_1/c_1$ এবং $M_2=u_2/c_2$; এখন $\rho_1u_1=\rho_2u_2$ আমরা জানি

$$\therefore\quad u_1^2\rho_1^2=M_1^2c_1^2\rho_1^2=M_1^2.\gamma p_1\rho_1$$

আবার $u_2^2\rho_2^2=M_2^2\gamma p_2\rho_2$

$$\therefore\quad M_1^2\gamma p_1\rho_1=M_2^2\gamma p_2\rho_2 \text{ বা } \frac{\rho_1}{\rho_2}=\frac{M_2^2p_2}{M_1^2p_1} \tag{৭-৩.১২}$$

আবার ৭-৩.৯ সমীকরণে $[p_1+\rho_1 u_1^2=p_2+\rho_2 u_2^2]$ এই মান বসালে পাচ্ছি

$$p_1+M_1^2\gamma p_1=p_2+M_2^2\gamma p_2 \text{ বা } \frac{p_2}{p_1}=\frac{1+\gamma M_1^2}{1+\gamma M_2^2} \quad (৭\text{-}৩.১৩)$$

$$\therefore \quad \frac{\rho_2}{\rho_1}=\frac{M_1^2 p_1}{M_2^2 p_2}=\frac{(\gamma-1)p_1/p_2+(\gamma+1)}{(\gamma+1)p_1/p_2+(\gamma-1)} \quad (৭\text{-}৩.১৪)$$

এই সম্পর্কের সমাধান করলে পাওয়া যাবে

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{\gamma(2M_1^2-1)+1}{\gamma+1} \text{ বা } \frac{\gamma+1}{\gamma(2M_2^2-1)+1} \quad (৭\text{-}৩.১৫)$$

এবং $$\frac{\rho_2}{\rho_1}=\frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2} \text{ বা } \frac{(\gamma-1)M_2^2+2}{M_2(\gamma+1)} \quad (৭\text{-}৩.১৬)$$

তাহলে $$M_1^2=\frac{(\gamma-1)M_2^2+2}{2\gamma M_2^2-(\gamma-1)}$$

এবং $$M_2^2=\frac{(\gamma-1)M_1^2+2}{2\gamma M_1^2-(\gamma-1)} \quad (৭\text{-}৩.১৭)$$

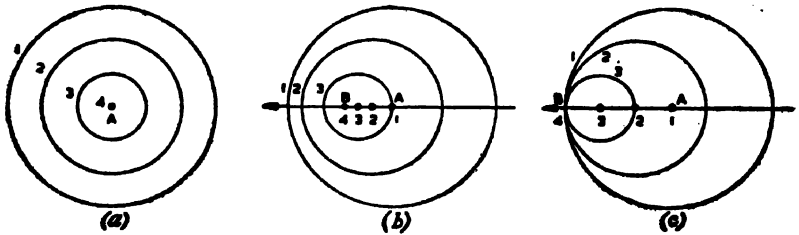
এখন $M_1=1=M_2$ হলে, $p_1=p_2$ এবং $\rho_1=\rho_2$ হবে এবং শক্-তরঙ্গ থাকবে না, আন্দোলন স্বাভাবিক বেগেই এগোবে। আবার $M_1>1$ হলে, ৭-৩.১৩ বা ৭-৩.১৪ বলবে যে $M_2<1$ —অর্থাৎ শব্দোত্তর বেগের কোন আন্দোলন, অভিঘাত অতিক্রম করলে সে অবশব্দ (subsonic) বেগে চলতে সুরু করবে। শক্-ঘাতের এটি বিশেষ ধর্ম।

অভিঘাত তরঙ্গের নানা আচরণ-বিবেচনার ক্ষেত্র এখন সুদূরপ্রসারী। বিস্ফোরণ, ক্ষেপণীবিদ্যা (ballistics), বিমান, রকেট বা দ্রুতগামী প্রাসের বায়ুগতিতত্ত্ব, দহনের উষ্মগতিতত্ত্ব, দ্রুতঘূর্ণমান যন্ত্রাংশের আলোচনা প্রভৃতি নানা বিষয়ে এর বিশেষ দরকার।

৭-৪. স্বন-প্রাচীর (Sonic Barrier)

১৯৪৪ সনে জার্মান V-রকেটগুলি শব্দোত্তর বেগে এসে ব্রিটেনের নগরগুলিতে প'ড়ে ত্রাসের সৃষ্টি করেছিল। কেননা তাদের শব্দ, লোকের কানে পৌঁছবার আগেই, তারা পৌঁছে যেত ব'লে, লোকে সাবধান হওয়ার সময় পেত না। এই রকেটগুলি অনেকসময়েই কিছু হাওয়াতেই অপ্রত্যাশিতভাবে

ফেটে চুরমার হয়ে যেত। যুদ্ধের পর বৈমানিকরা যখন শাব্দবেগের কাছাকাছি পৌঁছলেন তখন তাঁরা অনুভব করতে সুরু করলেন যে সামনের বায়ু যেন জমাট বেঁধে কঠিন প্রাচীরের মতো বিমানকে বাধা দিচ্ছে। অনেক ক্ষেত্রে বিমানকে, শব্দবেগে পৌঁছানমাত্রই হঠাৎ ভেঙে পড়তে দেখা গেল। শব্দ বা শব্দোত্তর বেগে বিমান-চালনে এই প্রচণ্ড বাধাকেই **শাব্দ** বা **স্বন-প্রাচীর** বলে।

ব্যাখ্যা ঃ শব্দের বেগে উড়ন্ত বিমান বায়ুতে যে ঘনীভবন সৃষ্টি করে তা আর বিমানকে ছাড়িয়ে সামনে এগিয়ে যেতে পারে না ; জমে উঠতে থাকে। সামনের মাধ্যমের ওপর এই ঘনীভবন, শক্ বা অভিঘাত তরঙ্গের মতোই আচরণ করে।

চিত্র 7.5—স্বন-প্রাচীরের উৎপত্তির ব্যাখ্যা

7.5 চিত্রে তিনটি উৎস এবং তাদের উৎপন্ন তরঙ্গের গতিপ্রকৃতি নির্দেশ করছে। উৎস তিনটি যথাক্রমে স্থির, অবশব্দ বেগে চলমান এবং স্বন-বেগে ধাবমান। (a)-তে বিভিন্ন মুহূর্তে উৎপন্ন গোলীয়-তরঙ্গ দেখানো হয়েছে —তারা সমকেন্দ্রিক, কেননা তাদের উৎসটি (A) স্থির। (b)-তে উৎস (A) অবশব্দ বেগে চলছে ; তার ভিন্ন ভিন্ন মুহূর্তে অবস্থান $1, 2, 3$ এবং উৎস যখন 4 অর্থাৎ B বিন্দুতে পৌঁছেছে, তখন উৎপন্ন গোলীয় তরঙ্গগুলির অবস্থান দেখানো হয়েছে। (c)-তে উৎস শব্দবেগে ছুটছে অর্থাৎ উৎস ও উৎপন্ন তরঙ্গ সমবেগে চলছে, কাজেই ঘনীভবন তরঙ্গ উৎসের আগে যাচ্ছে না ; তিনটি অবস্থানে উৎপন্ন তরঙ্গই B বিন্দুতে স্পর্শ করছে, অর্থাৎ সব ঘনীভবনগুলিই এক জায়গায় সমাপতিত হয়ে শাব্দপ্রাচীর উৎপন্ন করছে।

৭-৫. শব্দোত্তর প্রাসঙ্গ

শাব্দ-প্রাচীর অতিক্রম করতে বিমানের গঠনপ্রণালীর আমূল সংস্কার করতে হয়েছে। 7.6 চিত্রে একটি শব্দোত্তর জেট-বিমানের নমুনা দেখানো

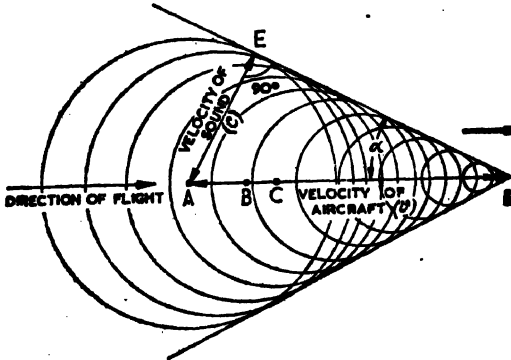
হয়েছে ; তার সীমারেখা পরবলয়াকার (parabolic), তার ডানা

চিত্র 7.6—শব্দোত্তর জেট-বিমান

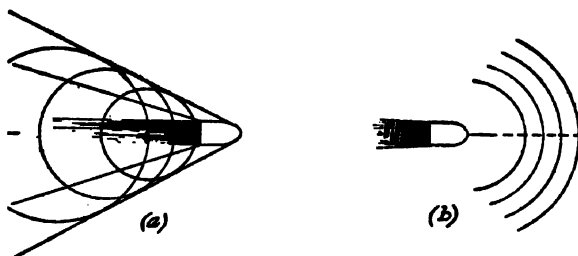
Δ-আকৃতি এবং আকার তীরশীর্ষের মতো। এইসব পরিবর্তনের ফলে বিমানটির শাব্দ-প্রাচীর অতিক্রম করা সম্ভব হয়েছে। রাইফেল-বুলেট শাব্দ-প্রাচীর অতিক্রম করতে পারে। তার আকার এবং প্রবল প্রাথমিক ভরবেগই শাব্দ-প্রাচীরের পিছুটান (drag) অতিক্রম করতে সহায়তা করে।

7.7 চিত্রে শব্দোত্তর প্রাস A থেকে D-তে পৌঁছতে যেসব গোলীয় ঘনীভবন তরঙ্গ উৎপন্ন করে, তারই কয়েকটি দেখানো হয়েছে। তারা DE এবং DF স্পর্শকতল পর্যন্ত পৌঁছেছে। স্পষ্টতই AD প্রাসবেগ (v) এবং AE তরঙ্গবেগের (c) সমানুপাতিক। সুতরাং

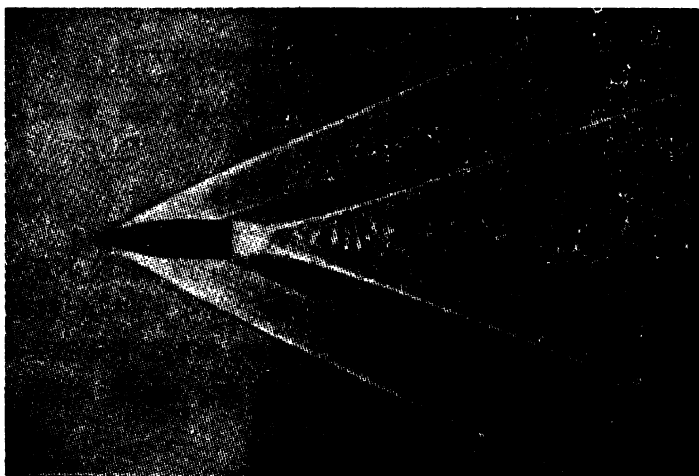
$$\text{ম্যাক-সংখ্যা} \quad M = v/c = \frac{AD}{AE} = \operatorname{cosec} \alpha \qquad (৭\text{-}৫.১)$$

α-কোণকে ম্যাক-কোণ আর DE রেখাকে ম্যাক-রেখা বলে। 7·8 (b) চিত্রে অবশব্দ প্রাস এবং তার দরুন ঘনীভবন তরঙ্গ দেখানো হয়েছে।

চিত্র 7.7—শব্দোত্তর-প্রাস-সৃষ্ট তরঙ্গমালা

শব্দোত্তর প্রাস বা জেট যে শক্-তরঙ্গ উৎপন্ন করে তারা শংকু-আকারে ছড়িয়ে পড়ে (7.8 চিত্র)। জেট-বিমানের সৃষ্ট সুপরিচিত প্রচণ্ড অভিঘাত শব্দই (sonic bang) এই অপসারী শক্-তরঙ্গ। বিমানের এঞ্জিনের

শব্দের আগেই বহু দূরের মেঘ বা কামান-গর্জনের মতো এই শব্দ শোনা যায়। প্রাস যতক্ষণ শব্দোত্তর বেগে ছোটে ততক্ষণই এই শংকু-আকারের তরঙ্গমুখ উৎপন্ন হতে থাকে। শংকু-আকারের এই তরঙ্গমুখ, প্রাসজ Huyghens তরঙ্গমালার (7.8*a* চিত্র) আবরণ (envelope) মাত্র। আলোকচিত্রে (7.9 চিত্র) এই আবরণ, অপসারী দু'জোড়া সরলরেখার মতো দেখায়।

চিত্র 7.8

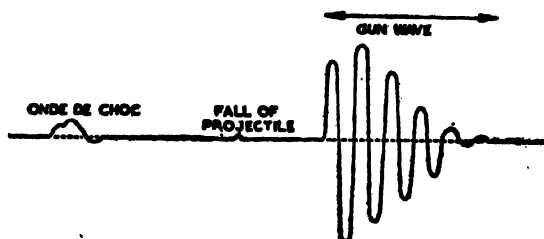
দ্রুতগামী বুলেট বা শেলের শব্দ ঃ প্রথম মহাযুদ্ধের সময়ে ফরাসী রণাঙ্গনে প্রথম টের পাওয়া গেল যে, রাইফেলের বুলেট বা দূরপাল্লার শক্তিশালী কামানের গোলা শব্দোত্তর বেগে ছোটে। এরা যে তরঙ্গশ্রেণী উৎপন্ন করে, তারা শব্দগ্রাহী যন্ত্রে তিনটি স্পষ্ট ও পৃথক্ সাড়া জাগায়—

(*i*) ফরাসী ভাষায়, 'onde de choc'—শক্তিশালী রাইফেল ছুঁড়লে

চিত্র 7.9—শব্দোত্তর বুলেট-সৃষ্ট শক্‌তরঙ্গ

প্রথমে যে চড়াক্ (crack) শব্দ শোনা যায়। শব্দটি শক্-তরঙ্গ ; শব্দোত্তর প্রাস শ্রোতাকে অতিক্রম ক'রে গেলে শোনা যায়। এইটি শক্-তরঙ্গ—শব্দোত্তর প্রাস-সৃষ্ট গোলীয় তরঙ্গমালার শংকুমুখ-আবরণ (7.8a চিত্রে) ; এরা প্রাসের পিছনে এবং পাশে ছড়ায়, সামনে যায় না। শব্দোত্তর জেটের sonic boom বা অভিঘাত শব্দও একই শ্রেণীর।

(*ii*) রাইফেল বা কামানের নিজস্ব স্বাভাবিক শব্দতরঙ্গ (Gun wave বা muzzle wave) ; পরে এবং মোটামুটি সামনে পেছনে চারদিকেই শোনা যায়।

(*iii*) নিক্ষিপ্ত গোলার বিস্ফোরণের শব্দ। 7.10 চিত্রে একটি শব্দগ্রাহী যন্ত্রের সাড়া দেখানো হয়েছে—তাতে এই তিনজাতীয় শব্দের নির্দেশই রয়েছে।

এই তিনরকম শব্দ ছাড়াও, গোলা বা বুলেটের সঙ্গে একটানা শোঁ-শোঁ শব্দ (whine) শোনা যায়। 7.9 চিত্রে প্রাসের পেছনে যে ঘূর্ণি দেখা

চিত্র 7.10—শব্দগ্রাহী যন্ত্রে প্রবল কামান-গর্জনের সাড়া

যাচ্ছে, তাতেই এই শব্দের উৎপত্তি। ১৪-৮ অনুচ্ছেদে আমরা বায়ুতে ঘূর্ণিজাত শব্দের আলোচনা করব।

৭-৬. স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ :

সমান এবং বিপরীত বলসংস্থার ক্রিয়ায় স্থিতিস্থাপক মাধ্যম বিকৃত হয়। সেই পীড়ন হঠাৎ অপসৃত হলে, (*i*) মাধ্যমের সেই অংশ গতিশীল হতে পারে কিম্বা (*ii*) পীড়ন-পরিবর্তন অবস্থাটিই ঘাত-তরঙ্গের আকারে চারিদিকে ছড়িয়ে পড়তে পারে। বাস্তবে দুই ঘটনাই একসঙ্গে ঘটে এবং তাকেই আমরা পীড়ন বা স্থিতিস্থাপক বিকৃতির ব্যাপ্তি বলতে পারি।

এইজাতীয় তরঙ্গের গাণিতীয় বিশ্লেষণ বা সঠিক প্রকৃতি নির্ধারণ খুবই জটিল, কেননা বিস্তৃত সমসারক মাধ্যমে যে রেখা বরাবর পীড়ন হয় তার দুই

সমকোণ অভিমুখে পীড়ন তরঙ্গ ছড়ায় ; মাধ্যম যদি বিষমসারক হয় (সাধারণত তাই-ই হয়) তখন তরঙ্গ অনেক বেশী জটিল হবে। সমসারক মাধ্যমে সাধারণভাবে তিনরকম মৌলিক স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ চলতে পারে ; যথা— সংকোচনজাত (compressional), আনমনজাত (flexural) এবং কৃন্তনজাত (shear)। নীচে আমরা তাদের সম্বন্ধে আভাষে আলোচনা করছি।

ক. সংকোচন তরঙ্গ : দীর্ঘ একটি কঠিন দণ্ডের অক্ষ বরাবর আঘাত করলে, তার স্তরগুলি পর্যায়ক্রমে ঘনীভূত ও তনুভূত হয়ে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের সৃষ্টি করে। কঠিন যদি বিস্তৃত হয় তাহলে অক্ষের দুই লম্ব বরাবরও সংকোচন ও প্রসারণের উৎপত্তি হয়। এই ধরনের তরঙ্গই সংকোচন তরঙ্গ। আগে বলা হয়েছে যে, শব্দ এক বিশেষ ধরনের স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ। এখন নিশ্চিত ক'রে বলা যায় যে শব্দ সংকোচন তরঙ্গ—সুতরাং বাস্তব মাধ্যম ছাড়া এর ব্যাপ্তি সম্ভব নয়।

যদি দণ্ডের বেধ ও প্রস্থ দৈর্ঘ্যের তুলনায় নগণ্য হয়, এবং তার প্রান্তগুলির গতি-স্বাধীনতা থাকে তাহলে সংকোচন তরঙ্গের বেগ $\sqrt{q/\rho}$ হয় ; q এখানে অনুদৈর্ঘ্য স্থিতিস্থাপক গুণাংক (১৩-২.৩ সমীকরণ)। যদি দণ্ডের সব মাপগুলি তুলনীয় হয় বা তার প্রান্তগুলি আবদ্ধ হয়, তাহলে q-এর বদলে ব্যবহার্য স্থিতিস্থাপক গুণাংক $q(1-\sigma)/(1+\sigma)(1-2\sigma)$ হয়ে দাঁড়ায় ($\sigma =$ পৌয়াসর অনুপাত)। এই ব্যঞ্জকের নানা প্রতিরূপ হতে পারে ; মাধ্যম যখন সমসারক এবং চারিদিকেই অসীম বিস্তৃত, তখন প্রতিরূপটি সরলতম— $(K+\frac{4}{3}G)$; K এখানে আয়তন-বিকার-গুণাংক আর G কৃন্তন-গুণাংক। বেগের প্রতিরূপভেদে সংকোচন তরঙ্গের প্রকারভেদ হয়, যথা

$$c^2 = \frac{q(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}$$ (বিস্তৃত ও আবদ্ধপ্রাপ্ত সাধারণ মাধ্যম)

(৭-৬.১)

$$\frac{K+\frac{4}{3}G}{\rho}$$ (সুবিস্তৃত কঠিন মাধ্যম) (৭-৬.২)

$$=K/\rho$$ (প্রবাহী মাধ্যম ; এই মাধ্যমের কৃন্তনবিকার হয় না)

৭-৬.২ সমীকরণ আবার পরে আলোচিত হবে। শেষেরটি পূর্বপরিচিত (৬-৩.২) সমীকরণ। তবে সব ক'টি তরঙ্গের ক্ষেত্রেই কণার স্পন্দন অনুদৈর্ঘ্য

এবং বেগ $c = \sqrt{J/\rho}$ যেখানে J যথাবিহিত (appropriate) স্থিতিস্থাপক-গুণাংক। ভূমিকম্পের মুখ্য তরঙ্গ সংকোচনশ্রেণীর।

খ. কৃন্তন-তরঙ্গ ঃ দীর্ঘ নলের এক প্রান্তে মোচড় দিলে তার কৃন্তন-বিকৃতি হয়; মোচড় অপসৃত হলে, নল বরাবর কৃন্তন-তরঙ্গ চলতে থাকে। এক্ষেত্রে আলোড়িত কণাগুলির স্পন্দন সমান্তরাল বৃত্তচাপ বরাবর হতে থাকে। তাদের সবার কেন্দ্রই নলের অক্ষের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দু। এরা কিন্তু তির্যক শ্রেণীর তরঙ্গ এবং বেগ $\sqrt{G/\rho}$, কাজে-কাজেই কঠিন মাধ্যম ছাড়া উৎপন্ন হতে পারে না। ১৩-৯ অনুচ্ছেদে এর বেগ-নির্ণয়ের বিশ্লেষণ হবে।

সংকোচন তরঙ্গ দুই মাধ্যমের বিভেদতলে তির্যকভাবে এসে পড়লে তার প্রত্যাবর্তী শাব্দচাপের, তল বরাবর এবং তলের লম্বদিকে, দুটি উপাংশ উৎপন্ন হবে। (i) সমান্তরাল উপাংশ, বিভেদতলের কাছাকাছি স্তরগুলির পাশের দিকে আপেক্ষিক সরণ ঘটাবে, ফলে কৃন্তন হবে আর (ii) লম্ব উপাংশের ক্রিয়ায় স্তরগুলির লম্ব বরাবর সংকোচন হবে। বিভেদ-তলের দু'পাশের মাধ্যম কঠিন হলে, দু'রকম তরঙ্গেরই প্রতিফলন ও প্রতিসরণ ঘটবে। প্রতিসৃত তরঙ্গের দ্রুতি এবং দিক্ স্নেল-সূত্র মেনে চলে। ভূকম্পে গৌণ-তরঙ্গ এই কৃন্তন-জাতীয় তরঙ্গ। প্রবাহী মাধ্যমে কৃন্তন-তরঙ্গের প্রতিফলন সম্ভব নয়।

গ. আনমন তরঙ্গ ঃ একপ্রান্তে আটকানো কোন দণ্ড বা রডের মুক্ত প্রান্ত চেপে অল্প নামালে [13.5(a) চিত্র] তাতে বংকনজনিত পীড়ন হয়। মুক্ত প্রান্ত ছেড়ে দিলে সেই প্রান্তের তির্যক স্পন্দন ঘটে। কাজেই অনুপ্রস্থ তরঙ্গের উৎপত্তি হয়; ১৩-৬.৫ সমীকরণে দেখা যাবে যে তার বেগ সরাসরি কম্পাংক-নির্ভর। আপাতসদৃশ হলেও এরা কৃন্তন-তরঙ্গ নয়, বরং বাস্তব সমদৈশিক মাধ্যমে আলোর তরঙ্গের সঙ্গে এদের সাদৃশ্য আছে।

কোন আড়ার (beam) ওপরে রাখা ভার হঠাৎ সরে গেলে এইজাতীয় তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। ভূকম্পের উৎপত্তির অন্যতম প্রধান কারণ, মাটির নীচে এইরকম ভারের স্থানচ্যুতি। কাজেই ভূকম্পনজনিত তরঙ্গ-প্রকৃতি-বিশ্লেষণে এদের আলোচনা খুবই গুরুত্বপূর্ণ। যদি কোন বীমের দুই প্রান্ত দুই আধারের ওপর রাখা থাকে, তবে তার আনমন স্পন্দনের কম্পাংকগুলি স্বাভাবিক (natural) সংখ্যার বর্গের সমানুপাতিক; কাজেই তাদের তীক্ষ্ণতার (pitch) মধ্যে সরল সম্পর্ক থাকে। সেইজন্যেই তো নানা বাদ্যযন্ত্রে এই ধরনের বীমের প্রয়োগ। বীমের প্রান্তের কোনটি অনড় থাকলে কিন্তু তাদের

কম্পাংকগুলির মধ্যে কোন সরল সম্পর্ক থাকবে না। অট্টালিকা বা সেতুর যথাযথ গঠনবিন্যাসে এইজাতীয় তরঙ্গের ভূমিকা-বিবেচনা অপরিহার্য।

৭.৭. ভূকম্প-তরঙ্গ :

বিস্তৃত বিষমসারক মাধ্যমে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের প্রকৃষ্ট উদাহরণ ভূকম্পনতরঙ্গ। এ বছরে (১৯৭৬) অনেকগুলি বিধ্বংসী ভূমিকম্প ঘটায় এ-বিষয়ে সাধারণের অনুসন্ধিৎসা অনেক বেড়ে গেছে। ভূভঙ্গের (fault) ধারে ধারে হেলনমাপক যন্ত্র (tilt-meter) বসিয়ে বা মাটির মধ্যে অনুদৈর্ঘ্য এবং অনুপ্রস্থ তরঙ্গের বেগের, সময়ের সাপেক্ষে পরিবর্তন মেপে, সাম্প্রতিক কালে বিজ্ঞানীরা কিছু কিছু ভূমিকম্পের পূর্বাভাস দিতে পেরেছেন। তবে ভূকম্পন-বিদ্যার (seismology) এখনও নেহাৎই শৈশবকাল।

ভূকম্পের উৎপত্তির কারণ নানাবিধ—তার সবগুলি এখনও অজানা। ভূত্বকের ভিন্ন ভিন্ন স্তরের আপেক্ষিক সরণ বা ঘর্ষণের ফলে যে শক্তি মুক্তি

চিত্র 7.11—ভূকম্প-তরঙ্গের সাড়া

পায় তাই ভূকম্পের রূপে ছড়িয়ে পড়ে। ভূত্বকের তলায় কিছুটা কঠিন অংশ ভেঙে পড়লে বা খসে গেলে একটা ধস্ নামে। কিম্বা অনেক গভীরে ক্ষয়, অবক্ষেপ (deposition), জোয়ার-ভাঁটা বা অপকেন্দ্র বলের ক্রিয়ায় হঠাৎ ভূচাপের পরিবর্তন হলে ভূমিকম্প হয়। সাম্প্রতিক স্তরচলন (plate tectonics) তত্ত্বমতে, ভূত্বকে অনেকগুলি স্তর আছে—তারা অতি ধীরে চলে বেড়াচ্ছে—তাদের সরাসরি সংঘর্ষ বা ঘর্ষণেই ভূমিকম্পের উৎপত্তি। যে অঞ্চলে ভূভঙ্গ বা স্তর-সংঘর্ষ ঘটে, তাকে ভূকম্প-নাভি বলে। মাটির তলায় সাধারণত 100 কিমি গভীরের মধ্যেই অধিকাংশ ভূকম্প-নাভি থাকে। তবে আরও অনেক গভীরে 700 কিমি পর্যন্ত এই নাভির অবস্থান হতে দেখা গেছে। ভূতলে নাভির নিকটতম বিন্দুকে ভূকম্পের উপকেন্দ্র (epicenter) বলে। ভূকম্পলিখ্ (seismograph) যন্ত্রে এদের অবস্থানই নির্দেশিত হয়।

ভূকম্প-নাভি থেকে নানা-জাতীয় তরঙ্গের উৎপত্তি হয়, তারা ভূতলের নানা জায়গায় ভিন্ন ভিন্ন সময়ে পৌঁছে ভূমিকম্প ঘটায়। 7.11 চিত্রে তাদের সাধারণ চেহারা দেখানো হয়েছে। তাদের শ্রেণীভেদ সম্বন্ধে সংক্ষেপে বলা হচ্ছে :

(ক) মুখ্য (P) তরঙ্গ : এরা সংকোচনজনিত **অনুদৈর্ঘ্য** তরঙ্গ, চলে সেকেণ্ডে প্রায় *5* মাইল বেগে এবং ভূকম্পলিখে সর্বাগ্রে পৌঁছায়। নাভি থেকে এদের পৃথিবীর গুরু (great) বৃত্তের জ্যা ধ'রে $\sqrt{J/\rho}$ বেগে [J দীর্ঘন (elongation)-বিকার গুণাংক] চলার কথা। কিন্তু তাদের চলার পথ বিষমসারক হওয়ায় বেগের মান ঠিক তা হয় না। এই তরঙ্গগুলির প্রকৃতি অনাবর্ত (irrotational) এবং উৎপত্তি, ধাক্কা (push) থেকে।

(খ) গৌণ (S) তরঙ্গ : এরা কৃন্তন বা আনমনজনিত **অনুপ্রস্থ** তরঙ্গ, ভূকণাগুলি তাদের সমকোণে স্পন্দিত হয়। এরাও নাভি থেকে গুরুবৃত্তের জ্যা বরাবর চলে, ভূকম্পলিখে দ্বিতীয় বার সাড়া জাগায়। এদের বেগ $\sqrt{G/\rho}$ সেকেণ্ডে প্রায় তিন মাইল। তাদের বিকৃতি, সমায়তন বা ঝাঁকি (shake) তরঙ্গও বলে।

(গ) Rayleigh তরঙ্গ : নাভি থেকে বেরিয়ে এই শ্রেণীর তরঙ্গমালা পৃথিবীর গুরুবৃত্তের পরিধি বরাবর চ'লে ভূকম্পলিখে পৌঁছায়। তারা ভূতলের খুব কাছাকাছি স্তরে সীমাবদ্ধ থাকে (9.10 চিত্র) ব'লে তারা ভূতল বরাবর বহু দূর পর্যন্ত অক্ষুণ্ণ থাকে—এ ব্যাপারে র‍্যালে তরঙ্গ অদ্বিতীয়। এদের ক্রিয়ায় কণার সরণ, তরঙ্গ অভিমুখের সমকোণে ঘটে এবং ব্যাপ্তি-অভিমুখের খাড়া এবং অনুভূমিক দুই তলেই, কণাসরণের উপাংশ থাকে। সমসারক মাধ্যমে এদের বেগ বদ্‌লাবার কথা নয়, কিন্তু ভূত্বক্ বিষমসারক হওয়ায় নাভি থেকে বেরিয়ে র‍্যালে তরঙ্গ অনেকগুলি তরঙ্গে ভেঙে যায়—ফলে যন্ত্রে একাধিক সাড়া লিপিবদ্ধ হয়। ভূ-পৃষ্ঠের বক্রতা র‍্যালে তরঙ্গের ক্ষেত্রে বিরাট মৃদু-ভাষ বেষ্টনীর বা (whispering gallery)-র মতো (§ 9-6) আচরণ করাতেই এরা দীর্ঘস্থায়ী হয়।

(ঘ) Love তরঙ্গ : ভূ-ত্বকের বিষমসারকত্ব এই দ্বিতীয় শ্রেণীর ভূতলবর্তী তরঙ্গের উৎপত্তির জন্যে দায়ী। এদের ক্রিয়ায় কণা-সরণ অনুদৈর্ঘ্য কিন্তু ব্যাপ্তি-অভিমুখের সমকোণে ঘটে। এরা নাভি থেকে যে বেগে বেরোয়, ভূতলে পৌঁছে সে-তুলনায় ধীরে চলে। ভূমিকম্পের অব্যবহিত পরেই পৃথিবীপৃষ্ঠের প্রায়

যেকোন স্থানেই এদের সাড়া মেলে। এদের সাহায্যেই, যেকোন জায়গায় ভূগর্ভে পারমাণবিক বিস্ফোরণ ঘটালে, তা ধরা যায়।

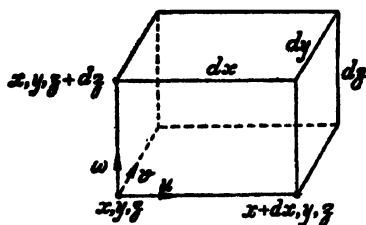
মুখ্য এবং গৌণ তরঙ্গ যন্ত্রে আলাদা ও সুস্পষ্ট বিক্ষেপ ঘটায়। কিন্তু দুই শ্রেণীর ভূতল-তরঙ্গ উপরিপাতিত হয়ে দীর্ঘ (Long) তরঙ্গ বা প্রধান ধাক্কাটি (shock) দেয়। এদের সাড়া দীর্ঘস্পন্দনের শ্রেণী—তবে তাদের প্রকৃতির পূর্ণ বিশ্লেষণ এখনও নাগালের বাইরেই রয়ে গেছে।

ভূকম্পতত্ত্ব যে শুধু আমাদের বিধ্বংসী দুর্বিপাকের রীতিপ্রকৃতি বুঝে তা এড়াবার চেষ্টায় মগ্ন তা নয়; তার নানা ব্যবহারিক কল্যাণকর প্রয়োগও মানুষ করছে। তাদের মধ্যে আছে (*i*) ভূকম্পের পূর্বাভাস, (*ii*) ভূকম্পসহ অট্টালিকা নির্মাণ এবং মাটির তলায় বিস্ফোরণ ঘটিয়ে কৃত্রিম ভূমিকম্প সৃষ্টি ক'রে তাদের সাহায্যে (*iii*) পৃথিবীর আভ্যন্তরীণ স্তরবিন্যাসের সমীক্ষা এবং (*iv*) লবণ, খনিজ তেল প্রভৃতির অনুসন্ধান।

৭-৮. ত্রিমাত্রিক তরঙ্গ

বিস্তৃত মাধ্যমে যেকোন আলোড়নই সাধারণ ভাবে x, y, z তিন অক্ষ ধরেই শক্তি ছড়িয়ে দেবে—তাই বিস্তৃত মাধ্যমে সাধারণ তরঙ্গমাত্রেই ত্রিমাত্রিক। উদাহরণ হিসাবে প্রথমেই আসে গোলীয় তরঙ্গ। স্থির জলতলে ঢিল পড়লে আমরা বৃত্তাকার তরঙ্গ ছড়াতে দেখি; কাজেই জলের মধ্যে বিস্ফোরণ হলে যে গোলীয় তরঙ্গের উৎপত্তি হবে তা সহজেই অনুমেয়। ত্রিমাত্রা তরঙ্গের বিশ্লেষণ করতে একমাত্রিক তরঙ্গ সমীকরণ ৬-৩.১-কে ত্রিমাত্রায় প্রসারিত করতে হবে। তা করতে হলে তিনটি সম্পর্ক—(*i*) সন্ততি সমীকরণ, (*ii*) মাধ্যমের স্থিতিস্থাপকতানির্দেশী সমীকরণ, (*iii*) নিউটনের গতিবিষয়ক দ্বিতীয় সূত্র—এদের সহায়তা চাই। কার্তেজীয় স্থানাংকে ত্রিমাত্রা তরঙ্গের অবকল সমীকরণ এদের সাহায্যেই প্রতিষ্ঠা করা হবে। এই প্রতিপাদনে সরলীকরণ খুব কম ব'লে একে যথাবিধি (rigorous) ধরা চলে। এই পদ্ধতি দীর্ঘায়িত হলেও সরাসরিভাবে পরিচিত সমতলীয় তরঙ্গের সমীকরণের সঙ্গে নিবিড় সম্পর্ক নির্দেশ করে।

ক. সন্ততি সমীকরণ (Equation of Continuity): এটি ভর-সংরক্ষণ সূত্রের গণিতীয় প্রতিরূপ এবং ধারা-প্রবাহী-তত্ত্ব (hydrodynamics) থেকে ব্যুৎপন্ন। এর প্রতিপাদ্য বিষয়, যেকোন বদ্ধ আয়তনের মধ্যে নিয়ত-প্রবাহী ভরের যতখানি ঢোকে ঠিক ততখানিই বেরিয়ে আসে। এই

সূত্র তাপপ্রবাহ, চৌম্বক বা স্থিরবৈদ্যুতিক ফ্লাক্সের বেলাতেও প্রযোজ্য। সূত্রটির প্রতিষ্ঠা নিম্নলিখিতভাবে করা যায়—

চিত্র 7.12—প্রবাহী মাধ্যমের আয়তাকার ক্ষুদ্রাংশ

কোন বহমান মাধ্যমের x, y, z বিন্দুতে $\delta x. \delta y. \delta z$ একটি ক্ষুদ্র আয়তনাংশ (7.12 চিত্রে $dx. dy. dz$) ধরা যাক। মাধ্যমের গতি ভরের ক্ষয় ঘটায় না। তাই আয়তনাংশে ভরের হ্রাস, তার ছয়টি তল দিয়ে যতখানি ভর বেরিয়ে যাচ্ছে তার সমান হবে। এইটিই সন্ততি সূত্রের মূল প্রতিজ্ঞা। তাকে গণিতের ভাষায় উপস্থাপিত করতে হলে, ধরা যাক, x, y, z বিন্দুতে মাধ্যমের বেগের উপাংশ যথাক্রমে u, v, w ; তারা (i) যথাক্রমে x, y, z অক্ষগুলির $+ve$ দিকে বাড়ে, (ii) তাদের মান x, y, z বিন্দুর অবস্থানের ওপর নির্ভর করে এবং (iii) অচর-মান নাও হতে পারে। এখন ঐ বিন্দুতে x-অক্ষের সমকোণে আয়তনাংশের y-z তলের ক্ষেত্রফল $\delta y. \delta z$ এবং ρ প্রবাহী মাধ্যমের ঘনত্ব ; $x+\delta x$ বিন্দুতে y-z-এর সমান্তরাল তলে ρ এবং u আলাদা ধরা হবে। তাহলে প্রথম তলের মধ্য দিয়ে ভরের প্রবেশ-হার এবং দ্বিতীয় তল দিয়ে ভরের নির্গম-হার যথাক্রমে

$$\rho u\, \delta y\, \delta z \quad \text{এবং} \quad \left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u).\, \delta x\right] \delta y\, \delta z$$

কাজেই এই তলদ্বয়ের মধ্য দিয়ে ভরের মোট নির্গম-হার দাঁড়াবে

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)\, \delta x.\, \delta y\, \delta z$$

অনুরূপ ফল হবে যথাক্রমে y এবং z অক্ষের সমকোণে জোড়া-জোড়া x-z এবং y-x তলের বেলায়। তাহলে তিনজোড়া তল দিয়ে বেরিয়ে-যাওয়া ভরের পরিমাণ হবে

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z}\right] \delta x.\, \delta x.\, \delta z$$

অন্যদিকে, আয়তনাংশ থেকে মোট ভর-হ্রাসের সময়-হার হবে

$$\delta x.\ \delta y.\ \delta z\left(-\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)$$

ভর সংরক্ষিত ব'লে এই দুই মান সমান হবে। অর্থাৎ

$$-\frac{\partial\rho}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \qquad (৭\text{-}৮.১)$$

এই সমীকরণই সন্ততি সমীকরণের গাণিতীয় প্রতিরূপ।

স্বল্পবিস্তার তরঙ্গে সন্ততি সমীকরণ : এক্ষেত্রে আমরা সংকোচনের (s) ভিত্তিতে সমীকরণ প্রতিষ্ঠা ক'রবো। এখন কোন ভরের ঘনত্ব ρ_0 থেকে বদ্‌লে ρ তে দাঁড়ালে, তার দুই আয়তনের মধ্যে সম্পর্ক

$$V=V_0+\delta V=V_0(1+\delta V/V_0)=V_0\left(1+\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)$$

$$\therefore\quad \frac{\rho}{\rho_0}=\frac{V_0}{V}=\left(1+\frac{\partial\xi}{\delta x}\right)^{-1}\simeq\left(1-\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)=(1+s)$$

যদি সংকোচনের $(\partial\xi/\partial x)$ মান অল্প ধরা হয়। আবার অবকলন ক'রে পাই

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)=\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)+u\left(\frac{\partial\rho}{\partial x}\right)$$

সংকোচন অল্প ব'লে দেশ-সাপেক্ষে ঘনত্বের পরিবর্তন $(\partial\rho/\partial x)$ নগণ্য।

কাজেই $\rho\dfrac{\partial u}{\partial x}\simeq\rho_0\dfrac{\partial u}{\partial x}$ এবং ৭-৮.১ সমীকরণ দাঁড়ায়

$$\rho_0\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial\rho}{\partial t}=-\rho_0\frac{\partial s}{\partial t}$$

বা

$$\frac{\partial s}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (৭\text{-}৮.২)$$

খ. নিউটনের দ্বিতীয় গতিসূত্রের প্রয়োগ : মাধ্যমে শব্দতরঙ্গ চললে বিন্দুভেদে চাপভেদ থাকে। x, y, z বিন্দুতে শাব্দচাপ p হলে, $x+\delta x$ তলে $p+\delta p$ হবে। কাজেই দুই তলে সম্মিলিত সক্রিয় বল হবে যথাক্রমে

$p.\delta y\,\delta z$ এবং $-\left(p+\frac{\partial p}{\partial x}\delta x\right)\delta y\,\delta z$; তাহলে $\delta x.\ \delta y.\ \delta z$ আয়তনের ওপর ক্রিয়াশীল অপ্রশমিত মোট বলের মান হয় $-(\partial p/\partial x)\,\delta x\,\delta y\,\delta z$; তাহলে নিউটনের দ্বিতীয় গতিসূত্র থেকে আসবে

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)\,\delta x\,\delta y\,\delta z=-\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\delta x\,\delta y\,\delta z$$

সুতরাং অপর দুজোড়া তলের কথাও বিবেচনা ক'রে পাচ্ছি

$$-\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial t}(\rho u),\quad -\frac{\partial p}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial t}(\rho v),\quad -\frac{\partial p}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) \qquad (৭\text{-}৮.৩)$$

গ. অবকল সমীকরণ : এই তিন সমীকরণকে আবার দেশ-সাপেক্ষে অবকলন ক'রে, তারপর যোগ করলে পাব

$$-\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\cdot\frac{\partial}{\partial t}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}\cdot\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}\cdot\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)$$

আবার t সাপেক্ষে ৭-৮.১ সমীকরণকে অবকলন করলে পাব

$$-\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}=\frac{\partial}{\partial t}\cdot\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial t}\cdot\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial t}\cdot\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)$$

আংশিক অবকলনের প্রক্রিয়া-ক্রম বিনিময় ব'লে এই দুই সমীকরণের ডান দিকের দুই মান অভিন্ন। কাজেই

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}=\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)p=\nabla^2 p \qquad (৭\text{-}৮.৪)$$

∇^2 এখানে ল্যাপলাসীয় সংকারক।

এবারে মাধ্যমের স্থিতিস্থাপকতা ধর্মের সহায়তা নেব। সংকোচন (s) স্বল্পমান হলে শাব্দচাপ (p) এবং যেকোন নিমেষে ভর-ঘনত্বের (ρ) সঙ্গে তার সম্পর্ক যথাক্রমে $p=Ks$ এবং $\rho=\rho_0(1+s)$; এখানে K মাধ্যমের আয়তন-বিকার-গুণাংক এবং ρ_0 অবিকৃত ভরের ঘনত্ব।

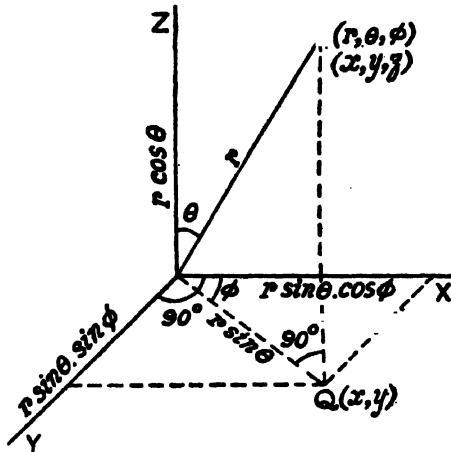
$$\therefore\quad \rho=\rho_0\left(1+\frac{p}{K}\right) \text{ এবং } \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2}=\frac{\rho_0}{K}\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=\frac{1}{c^2}\cdot\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

৭-৮.৪ সমীকরণে $\partial^2 p/\partial t^2$-এর এই মান বসিয়ে পাই

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=c^2.\nabla^2 p \qquad (৭\text{-}৮.৫)$$

এটি সমসারক মাধ্যমে ত্রিমাত্রিক শব্দতরঙ্গের **শাব্দচাপসম্বলিত অবকল সমীকরণ**। এর থেকে x-অক্ষ বরাবর সমতলীয় তরঙ্গের সমীকরণ দাঁড়াবে

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=c^2\ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$$

আমাদের পূর্বপরিচিত ৫-৯.১ অবকল সমীকরণ। সাধারণ ত্রিমাত্রিক তরঙ্গকে

চিত্র 7.13—ত্রিমাত্রায় ধ্রুবীয় নির্দেশ-ব্যবস্থা

ধ্রুবীয় বা বেলনীয় (cylindrical) তন্ত্রে প্রকাশ করলে বিশেষ বিশেষ ক্ষেত্রে গণনায় সুবিধা হয়। ধ্রুবীয় তন্ত্রে (7.12 চিত্র) স্থানাংক r, θ, ϕ ধরলে, দেখা যাচ্ছে

$$x=r\sin\theta.\ \cos\phi,\quad y=r\sin\theta.\sin\phi,\quad z=r\cos\theta$$

তাহলে ৭-৮.৫ সমীকরণের রূপ হবে

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=c^2\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}\right)$$

$$=c^2\left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\cdot\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r^2\sin\theta}\left\{\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial p}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial^2 p}{\partial\phi^2}\right\}\right]$$

(৭-৮.৬)

৭-৯. বেগ-বিভব এবং ত্রিমাত্রিক তরঙ্গ সমীকরণ :

ক. সংজ্ঞা : বৈদ্যুতিক বা চৌম্বক ক্ষেত্রে প্রাবল্য ও বিভবের মধ্যে সম্পর্কের নজির টেনে প্রবাহী মাধ্যমের বেগ-বিভবের সংজ্ঞা নির্দিষ্ট হয়েছে। তাতে বলা হয়েছে যে, বেগ-বিভব (ψ) ঐ মাধ্যমের যেকোন বিন্দুর স্থানাংকের এমন এক অদিশ্ অপেক্ষক (scalar function) যে, সেখানে কোন দিক্ বরাবর দেশ-সাপেক্ষে এর কমার হার, ঐ বিন্দুতে সেই দিকে মাধ্যম-বেগের উপাংশের সমান।*, অর্থাৎ

$$u = -\frac{\partial\psi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial\psi}{\partial y}, \quad w = -\frac{\partial\psi}{\partial z} \qquad (৭\text{-}৯.১)$$

কণা-বেগ সদিশ্ রাশি ; অনেক ক্ষেত্রে অদিশ্ রাশি বলেই বেগ-বিভব বার করা সহজ ; কারণ x, y, z-এর অপেক্ষক হিসাবে ψ জানা থাকলে, বেগ-সদিশ্ বার করা যায়। যেকোন বিন্দুতে কণা-বেগ, ঐ বিন্দুর মধ্যে দিয়ে টানা $\psi =$ ধ্রুবক, এই তলের সমকোণে ক্রিয়া করে।

খ. অবকল সমীকরণের প্রতিষ্ঠা :

(i) সন্ততি সূত্র ৭-৮.২ থেকে দেখা যাচ্ছে যে, স্বল্পবিস্তার তরঙ্গের বেলায়

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\rho_0\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right) = +\rho_0\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = \frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\partial\rho}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho_0(1+s)\right]$$

$$\therefore \qquad \nabla^2\psi = \frac{\partial s}{\partial t} \qquad (৭\text{-}৯.২)$$

(ii) নিউটনের দ্বিতীয় গতিসূত্র থেকে স্বল্পবিস্তার তরঙ্গের ক্ষেত্রে ৭-৮.৩ সমীকরণগুলিকে

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0\dot{u}, \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0\dot{v} \text{ এবং } -\frac{\partial \rho}{\partial x} = \rho_0\dot{w}$$

রূপে লেখা যায়। এদের যথাক্রমে dx, dy, dz দিয়ে গুণ ক'রে যোগ করলে পাই

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\cdot dx + \frac{\partial p}{\partial y}\cdot dy + \frac{\partial p}{\partial z}\cdot dz\right.$$

* যেমন $E_x = -dV/dx$, $E_y = -dV/dy$, $E_z = -dV/dz$.

$$= -\rho_0(\dot{u}.dx + \dot{v}.\ dy + \dot{w}.dz)$$

$$= -\ \rho_0\frac{\partial}{\partial t}(u.dx + v.dy + w.dz)$$

$$= \rho_0\ \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\cdot dx + \frac{\partial\psi}{\partial y}\cdot dy + \frac{\partial\psi}{\partial z}\cdot dz\right)$$

সমীকরণে দুই ধারে বন্ধনীর মধ্যের অংশ দুটি যথাক্রমে p এবং ψ-এর দেশাংক-সাপেক্ষে পূর্ণ অবকল (perfect differential)। সুতরাং

$$dp = \rho_0\frac{\partial}{\partial t}(d\psi) = \rho_0 d\left(\frac{\partial\psi}{\partial t}\right) \qquad (৭\text{-}৯.৩ক)$$

এর সমাকলন করলে মিলবে $\qquad p = \rho_0\psi + C \qquad$ (৭-৯.৩খ)

এক্ষেত্রে ψ-এর মান যদি এমন নেওয়া যায়, যাতে $p=0$ হলে $\psi=0$ হয়, তাহলে সমাকলন ধ্রুবক $C=0$ হয়ে যাবে।

(*iii*) ৭-৯.৩(খ) সমীকরণে স্থিতিস্থাপকতা সূত্র প্রয়োগ করলে পাব

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{p}{\rho_0} = \frac{Ks}{\rho_0} = c^2 s \qquad (৭\text{-}৯.৪)$$

$$\therefore\quad \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = c^2\cdot\frac{\partial s}{\partial t} = c^2.\nabla^2\psi\ (৭\text{-}৯.২\ \text{থেকে})\quad (৭\text{-}৯.৫)$$

বেগ-বিভব-সম্বলিত এই তরঙ্গ-সমীকরণে ল্যাপল্যাসিয়ান সংকারক যেকোন স্থানাংক-তন্ত্রে নেওয়া চলে।

৭.১০. গোলীয় তরঙ্গ :

ত্রিদেশ বা ত্রিমাত্রা তরঙ্গের সরলতম এবং সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ উদাহরণ গোলীয় তরঙ্গ। বিস্তৃত সমসারক মাধ্যমে সাধারণভাবে গোলীয় তরঙ্গেরই উৎপত্তি হয়, বিশেষত উৎস যদি ছোট হয়।

শাব্দচাপভিত্তিক অবকল সমীকরণ : ধ্রুবীয় তন্ত্রে ত্রিমাত্রা তরঙ্গের অবকল সমীকরণ (৭-৮.৬) হচ্ছে

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2\left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\cdot\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2.\ \sin\theta}\left\{\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\cdot\frac{\partial p}{\partial\theta}\right) + \frac{\partial^2 p}{\partial\phi^2}\right\}\right]$$

গোলকের আকার-সামঞ্জস্য (symmetry) আছে ব'লে তার একটি মাত্র প্রাচল, তার ব্যাস ; সুতরাং গোলীয় তরঙ্গে শাব্দচাপ p কেবল উৎস থেকে দূরত্ব r এবং

কাল t-র ওপরে নির্ভরশীল, θ- এবং ϕ-নিরপেক্ষ। কাজেই ল্যাপল্যাসীয় সংকারক হবে $\nabla^2 = \partial^2/\partial r^2 + \partial/\partial r$ এবং তাহলে

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 . \nabla^2 p = c^2\left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} . \frac{\partial p}{\partial r}\right)$$

$$= c^2 . \frac{1}{r} . \frac{\partial^2 (rp)}{\partial r^2}$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 (rp)}{\partial t^2} = c^2 . \frac{\partial^2 (rp)}{\partial r^2} \qquad (৭\text{-}১০.১)$$

বেগ-বিভব-ভিত্তিক অবকল সমীকরণ : তরঙ্গ গোলীয় হলে তার শক্তি অরীয় পথে (অর্থাৎ ব্যাসার্ধ বরাবর) চলে। সেক্ষেত্রে অরীয় বেগ এবং বেগ-বিভবের মধে সম্পর্ক হবে $u_r = -\partial\psi/\partial r$; তাহলে ৭-৯.২ থেকে ল্যাপল্যাসীয় সংকারকের গোলীয় রূপ প্রয়োগ ক'রে পাচ্ছি

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} . \frac{\partial \psi}{\partial r}$$

আবার ৭-৯.৩ক সমীকরণ থেকে তুলনা ক'রে পাব

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho_0 \frac{\partial}{\partial r}(\dot{\psi}) \quad \text{বা} \quad p = \rho_0 \dot{\psi}$$

আবার $$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho_0 \ddot{\psi} = \frac{\partial}{\partial t}(Ks) = K . \frac{\partial s}{\partial t}$$

অতএব $$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\rho_0}{K} . \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \nabla^2 \psi$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 . \nabla^2 \psi = c^2\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} . \frac{\partial \psi}{\partial r}\right)$$

$$= c^2 . \frac{1}{r} . \frac{\partial^2 (r\psi)}{\partial r^2}$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 (r\psi)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (r\psi)}{\partial r^2} \qquad (৭\text{-}১০.২)$$

অন্যান্য প্রাচলভিত্তিক অবকল সমীকরণ : সংকোচন (s) এবং ঘনত্ব-পরিবর্তন ($d\rho$) দুইই শাব্দচাপের সমানুপাতিক, কেননা

$$p = Ks \doteq K\left(-\frac{dV}{V_0}\right) = K\frac{d\rho}{\rho_0} \qquad (৭\text{-}১০.৩)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = c^2.\nabla^2 s \text{ এবং } \frac{\partial^2}{\partial t^2}(d\rho) = c^2.\nabla^2(d\rho) \quad (৭\text{-}১০.৪)$$

$$\text{আর} \quad \frac{\partial^2 (rs)}{\partial t^2} = c^2.\nabla^2 (rs) \text{ এবং } \frac{\partial^2 (r.\,d\rho)}{\partial t^2} = c^2.\nabla^2 (r.\,d\rho)$$

প্রাচল-বৈশিষ্ট্য : লক্ষণীয় যে, ব্যবহৃত প্রতিটি প্রাচলই অদিশ্ রাশি। শাব্দপ্রাচল সদিশ্ হলে কণাসরণ $\vec{\mathbf{r}}$ এর উপাংশ x, y এবং z এবং তার বেগ $\vec{\mathbf{v}}$-র উপাংশ u, v, w গণনার অন্তর্ভুক্ত হয়ে সমীকরণের ব্যুৎপত্তি অসম্ভব জটিল ক'রে তোলে।

আগের দিনে শব্দ-সম্বন্ধীয় রচনায় বেগ-বিভবের মতো একটি কাল্পনিক প্রাচলের ব্যবহার বহুল হ'ত। (প্রবাহী-ধারা-বিদ্যায় প্রবাহীর সান্দ্রতার বিবেচনায় এটি অপরিহার্য)। আজ তার স্থান নিয়েছে শাব্দচাপ। শাব্দক্ষেত্রের ভিন্ন ভিন্ন প্রাচলের সঙ্গে এর সম্পর্ক (৭-৯.৩ এবং ৭-১০.৩) থাকায়, এই রাশিটি তাদের মধ্যে সম্পর্ক রচনা করে। তা ছাড়া শাব্দচাপ মাপা সবচেয়ে সহজ তাই নিরীক্ষিত প্রাচলটি, এর ভিত্তিতে প্রকাশ করতে পারলেই ভালো হয়।

৭-১১. গোলীয় তরঙ্গের অবকল সমীকরণের সরাসরি প্রতিষ্ঠা :

ত্রিদেশ তরঙ্গের বেলায় যেমন করা হয়েছে, তেমনি সন্ততি-সূত্র, নিউটনের সূত্র ও স্থিতিস্থাপকতা-সূত্র প্রয়োগ ক'রেও গোলীয় তরঙ্গের বেলায় ৭-১০.১ সমীকরণ প্রতিষ্ঠা করা যায়। আমরা অন্যভাবে এই তরঙ্গের ক্ষেত্রে, বিচলিত কণার সরণভিত্তিক অবকল সমীকরণ প্রতিষ্ঠা ক'রবো।

আমরা আগেই দেখেছি, সামঞ্জস্যের দরুন গোলীয় তরঙ্গে শক্তি, ব্যাসার্ধ বরাবর চলে এবং যেকোন মুহূর্তে কোন শাব্দ-প্রাচল কেবলমাত্র তার ব্যাসার্ধের (r) অপেক্ষক। অতি অল্পকাল ব্যবধানে গোলীয় তরঙ্গের ব্যাসার্ধ r এবং $r+\delta r$ ধরলে, তাদের মধ্যবর্তী আয়তনাংশের ভর $4\pi r^2.\delta r.\rho$ (ক্ষেত্রফল $\times$ বেধ $\times$ ঘনত্ব) হবে। খোলকের (shell) বেধ খুব সামান্য ব'লে, সব কণাগুলির সরণই ξ ধরা যায়। এখন খোলকের দুই প্রান্তে শাব্দচাপ যথাক্রমে p এবং $p-(\partial p/\partial r)\delta r$ এবং এই চাপবৈষম্যই আয়তনাংশের ওপর (ভর $\times$ ত্বরণ মানের) বল সৃষ্টি করবে। অর্থাৎ

$$-4\pi r^2.\frac{\partial p}{\partial r}.\delta r = 4\pi r^2.\,\delta r.\rho \times \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

বা $$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial r} \qquad (৭\text{-}১১.১)$$

এবারে বেশী বেধ $\triangle r$ মাপের খোলকের কথা ভাবা যাক ; তার ভেতরের এবং বাইরের তলে কণা-সরণ যথাক্রমে ξ এবং ξ' ধরি। তাহলে সরণের আগে এবং পরে খোলকের আয়তন হবে যথাক্রমে

$$V_0 = 4\pi r^2.\ \triangle r \text{ এবং } V = 4\pi(r+\xi)^2(\triangle r + \xi' - \xi)$$

$$\therefore \quad V = 4\pi r^2(1+\xi/r)^2(\triangle r + \partial\xi)$$

$$= 4\pi r^2 \triangle r(1+\xi/r)^2\left(1+\frac{\partial\xi}{\triangle r}\right)$$

$$= V_0(1+2\xi/r+\xi^2/r^2)(1+\partial\xi/\triangle r)$$

$$= V_0\left(1+\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\triangle r}+\xi^2/r^2+\frac{2\xi}{r}.\frac{\partial\xi}{\triangle r}+\frac{\xi^2}{r^2}.\frac{\partial\xi}{\triangle r}\right)$$

$$\simeq V_0\left(1+\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right) \qquad (৭\text{-}১১.২)$$

ξ এবং $\partial\xi$ ক্ষুদ্র রাশি ব'লে, পরের রাশিগুলি দ্বিতীয় ও তৃতীয় ক্রমের ক্ষুদ্র রাশি, তাই নগণ্য। এখন শব্দতরঙ্গের ক্ষেত্রে চাপ-আয়তনের মধ্যে পরিবর্তন

$$p_0 V_0^{\gamma} = pV^{\gamma}$$

$$\therefore \quad p = \left(\frac{p_0}{V/V_0}\right)^{\gamma} = \frac{p_0}{\left(1+\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right)^{\gamma}}$$

$$\therefore \quad \frac{\partial p}{\partial r} = -\gamma p_0 \frac{\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right)}{\left(1+\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right)^{\gamma+1}}$$

৭-১১.১ থেকে $$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = -\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial r} = +\frac{\gamma p_0}{\rho_0}.\frac{\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right)}{\left(1+\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right)^{\gamma+1}}$$

স্বল্পবিস্তার তরঙ্গে, উৎস থেকে দূরে, হরের দ্বিতীয় ও তৃতীয় রাশি নগণ্য। সুতরাং

$$\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} = c^2.\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{2\xi}{r}+\frac{\partial\xi}{\partial r}\right) = c^2\left(\frac{2}{r}.\frac{\partial\xi}{\partial r}-\frac{2\xi}{r^2}+\frac{\partial^2\xi}{\partial r^2}\right) \qquad (৭\text{-}১১.৩)$$

এইটি গোলীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রে সরণভিত্তিক অবকল সমীকরণ। আবার $r \gg \xi$ হলে, দাঁড়ায়

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} \right) = c^2 \, \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\xi)$$

বা $$\frac{\partial (r\xi)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\xi) \qquad (৭\text{-}১১.৪)$$

৭-১২. গোলীয় তরঙ্গের অবকল সমীকরণের সমাধান :

সমতলীয় ও গোলীয় তরঙ্গের সমীকরণ ৫-৯.১ আর ৭-১০.১, ৭-১০.২ ৭-১০.৪ বা ৭-১১.৪ তুলনা ক'রে দেখা যাচ্ছে যে, তাদের প্রতিরূপ সদৃশ ; কেবল হরে x-এর বদলে r আর লবে ϕ-এর বদলে rp, $r\psi$, rs, $rd\rho$ বা $r\xi$ আছে। তাহলে সাদৃশ্য থেকে তাদের সমাধান দাঁড়াবে

$$rp = f\,(ct \pm r) \text{ বা } r\xi = f(ct \pm r) \qquad (৭\text{-}১২.১)$$

বা $$p = \frac{A}{r} f_1\,(ct - r) + \frac{B}{r} f_2(ct + r) \qquad (৭\text{-}১২.২)$$

এবং $$\xi = \frac{A'}{r} f_1'(ct - r) + \frac{B'}{r} f_2'(ct + r) \qquad (৭\text{-}১২.৩)$$

দুই সমাধানেই প্রথম রাশিটি বহির্মুখী অপসারী তরঙ্গ, দ্বিতীয়টি উৎসাভিমুখী অভিসারী তরঙ্গ। শব্দে অভিসারী তরঙ্গের ব্যবহারিক গুরুত্ব সামান্যই। সমাধানে f_1, f_1' স্বেচ্ছিক ফলন (arbitrary functions)। সমাধান থেকে দেখা যায় যে, উৎস থেকে যত দূরে যাওয়া যাবে কণা-সরণ, শাব্দচাপ বা সংকোচনের মাত্রা গোলীয় তরঙ্গে ততই কমে যাবে ; কিন্তু সমতলীয় তরঙ্গের বেলায় তারা অপরিবর্তিত থাকে।

আমরা সমঞ্জস তরঙ্গ নিয়েই বেশী মাথা ঘামাই, সুতরাং স্বেচ্ছিক ফলন f-এর বদলে সাইন বা কোসাইন রাশি সমাধানে বসবে, অর্থাৎ

$$p = \frac{A}{r} \cdot \frac{\sin}{\cos} \frac{2\pi}{\lambda} (ct - r) = \frac{A}{r} \cdot \frac{\sin}{\cos} (\omega t - \beta r) \qquad (৭\text{-}১২.৪)$$

এখানে একক দূরত্বে শাব্দ-চাপ-বিস্তার A এবং যেকোন দূরত্বে A/r হচ্ছে। সুতরাং

$$p = p_m \frac{\sin}{\cos}(\omega t - \beta r)$$

সরণের বা সংকোচনের বেলাতেও অনুরূপ ব্যঞ্জক আসবে। যেকোন ক্ষেত্রেই বিস্তারের মান, উৎস থেকে দূরত্বের ব্যস্তানুপাতে বদলায়। জটিল সূচক প্রকরণে লিখলে সমীকরণের চেহারা হয়

$$\xi = (A/r)\, e^{j(\omega t - \beta r)} \qquad (৭\text{-}১২.৫)$$

বা

$$\psi = (A/r)\, e^{j(\omega t - \beta r)} \qquad (৭\text{-}১২.৬)$$

৭-১৩. গোলীয় তরঙ্গে শাব্দ বাধ :

৬-৬.৬ সমীকরণে দেখা যাচ্ছে যে, $v_m = p/\rho_0 c$; এবং $\rho_0 c$-কে শাব্দ বা বিশিষ্ট বাধ বলা হয়েছে। গোলীয় তরঙ্গে সংজ্ঞানুসারে শাব্দ বাধের (Z_s) মান হবে তাহলে p/v_r ; এই মান বার করতে ৭-১২.৬ ব্যবহার ক'রবো, কেননা

$$p = \rho_0 \dot{\psi} \text{ এবং } v_r = -\frac{\partial \psi}{\partial r}$$

$$\therefore \quad p = \rho_0 \frac{\partial \psi}{\partial t} = \rho_0 (j\omega A/r).\, e^{j(\omega t - \beta r)} = j\omega \rho_0 \psi \qquad (৭\text{-}১৩.১)$$

$$v_r = -\frac{\partial \psi}{\partial r} = -\left[-\frac{A}{r^2}.\, e^{j(\omega t - \beta r)} - j\beta \frac{A}{r}\, e^{j(\omega t - \beta r)} \right]$$

$$= \frac{A}{r}\, e^{j(\omega t - \beta r)} \left[\frac{1}{r} + j\beta \right] = \psi \left(\frac{1}{r} + j\beta \right)$$

$$= j\psi\beta \left(1 + \frac{1}{j\beta r} \right) = j\psi\beta \left(1 - \frac{j}{\beta r} \right) \qquad (৭\text{-}১৩.২)$$

এখন $Z_s = p/v_r = \dfrac{j\omega \rho_0 \psi}{j\psi\beta(1 - j/\beta r)} = \dfrac{\omega \rho_0}{\beta(1 - j/\beta r)}$

$$= \frac{\omega \rho_0}{\beta} . \frac{1 + j/\beta r}{1 + 1/\beta^2 r^2}$$

$$= \frac{2\pi n \rho_0}{2\pi/\lambda} \cdot \frac{1+j/\beta r}{1+1/\beta^2 r^2} = c\rho_0 \frac{(1+j/\beta r)}{1+1/\beta^2 r^2}$$

$$= \rho_0 c \left(\frac{1}{1+1/\beta^2 r^2} + j \frac{1/\beta r}{1+1/\beta^2 r^2} \right)$$

$$= \rho_0 c \left(\frac{\beta^2 r^2}{\beta^2 r^2 + 1} + j \frac{\beta r}{\beta^2 r^2 + 1} \right)$$

$$= \frac{c\rho_0 \beta r}{\sqrt{1+\beta^2 r^2}} \left(\frac{\beta r}{\sqrt{1+\beta^2 r^2}} + j \frac{1}{\sqrt{1+\beta^2 r^2}} \right)$$

(৭-১৩.৩)

চিত্র 7.14—শাব্দ-বাধ ত্রিভুজ

$$= c\rho_0 \frac{\beta r}{\sqrt{1+\beta^2 r^2}} (\cos\theta + j\sin\theta) \quad [\text{ 7.14 চিত্র* }]$$

$$= c\rho_0 \beta r e^{j\theta} / \sqrt{1+\beta^2 r^2} \qquad (\text{ ৭-১৩.৪ })$$

কাজেই দেখা যাচ্ছে গোলীয় তরঙ্গের শাব্দ বাধের দুটি অংশ, একটি বিশিষ্ট বাধ $c\rho_0$, অপরটি মান এবং দশাযুক্ত আর-একটি রাশি। সুতরাং শাব্দ বাধের মান দাঁড়াচ্ছে

$$|Z_s| = c\rho_0 \frac{\beta r}{\sqrt{1+\beta^2 r^2}} = c\rho_0 \cos\theta \qquad (\text{ ৭-১৩.৫ })$$

৭-১৩.৩-কে $Z_s = R_s + jX_s$ আকারে প্রকাশ করা যায়। তখন

$$R_s = c\rho_0 \frac{\beta^2 r^2}{1+\beta^2 r^2} \text{ এবং } X_s = c\rho_0 \frac{\beta r}{1+\beta^2 r^2}$$

(৭-১৩.৬)

অর্থাৎ গোলীয় তরঙ্গে শাব্দ বাধের রোধ-অংশ R_s এবং প্রতিক্রিয়া-অংশ X_s ; কেন্দ্র থেকে অনেক দূরে $\beta^2 r^2 \gg 1$, অতএব $R_s \simeq c\rho_0$ এবং $X_s \simeq 0$ হবে ; অর্থাৎ কেন্দ্র থেকে অনেক দূরে গোলীয় তরঙ্গ সমতলীয় তরঙ্গ হয়ে যায়।

৭-১৪. গোলীয় তরঙ্গে তীব্রতা :

একক ক্ষেত্রের মধ্যে দিয়ে শাব্দ শক্তির গড় লম্ব-প্রবাহের সময়-হারকে শাব্দ তীব্রতা বলে। স্পষ্টতই তীব্রতাকে শাব্দ ক্ষমতাপ্রবাহও বলা চলে এবং

* ছবিতে β-র বদলে k আছে।

কোন মুহূর্তে এই প্রবাহ (i) সেই নিমেষের ক্ষমতা (P) এবং কণা বেগের (v_r) গুণফল।

$$\therefore \quad i = Pv_r = (P_0 + p)v_r$$

একটি পূর্ণ তরঙ্গ গেলে বা একবার পূর্ণ দোলন হলে, i-এর এক চক্র পূর্ণ হবে, এবং শাব্দ প্রাবল্যের মান হবে তারই গড় মান। এখন এক পূর্ণ দোলন বলতে চাপ-পরিবর্তনের পূর্ণ চক্র বোঝাবে; তাতে P_0, সাম্য চাপ ব'লে অপরিবর্তিত থাকবে এবং শাব্দ শক্তিতে তার কোন অবদান থাকবে না। সুতরাং শাব্দ তীব্রতা হবে

$$I = \int_0^T pv_r\, dt/T = \frac{1}{T}\int_0^T p_m \sin \omega t.\, (v_r)_m \sin(\omega t - \theta).\, dt$$

[7.14 চিত্রে দেখছি p এবং v_r-এর মধ্যে দশাভেদ $\theta\ (= \tan^{-1} 1/\beta r)$

$$= \tfrac{1}{2}.\frac{p_m (v_r)_m}{T}\int_0^T [\cos\{\omega t - (\omega t - \theta)\} - \cos\{\omega t + (\omega t - \theta)\}]dt$$

$$= \tfrac{1}{2}.\frac{p_m (v_r)_m}{T}\int_0^T [\cos\theta - \cos(2\omega t - \theta)]dt$$

$$= \tfrac{1}{2}\,\frac{p_m (v_r)_m}{T}\cos\theta.T \qquad (৭\text{-}১৪.১)$$

[∵ দ্বিতীয় রাশির সমাকলন ফল শূন্য]

$$= \frac{p_m}{\sqrt{2}}.\frac{(v_r)_m}{\sqrt{2}}.\cos\theta = p_{r.m.s.}\,(v_r)_{rms}\cos\theta \qquad (৭\text{-}১৪.২)$$

$$= p_{rms}\,(v_r)_{rms}\,\frac{|Z_s|}{c\rho_0} \qquad (৭\text{-}১৩.৫)$$

$$= p_{rms}\,(v_r)_{rms}\,\frac{1}{c\rho_0}.\frac{p_{rms}}{v_{rms}} \qquad (Z_s\text{-এর সংজ্ঞা থেকে}).$$

$$= \frac{(p_{rms})^2}{c\rho_0} = \tfrac{1}{2}\,\frac{p_m^2}{c\rho_0} \qquad (৭\text{-}১৪.৩)$$

৬-৬.৪ সমীকরণ সমতলীয় তরঙ্গের তীব্রতার মান নির্দেশ করছে। এখানেও তার প্রতিরূপ একই।

প্রশ্নমালা

১। শব্দতরঙ্গের বিস্তার বেশী ধ'রে নিয়ে কোন গ্যাসীয় মাধ্যমে তার ব্যাপ্তি-সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর। এই সমীকরণের ভিত্তিতে এইজাতীয় তরঙ্গের ব্যাপ্তি আলোচনা কর।

২। শক্-তরঙ্গ কাকে বলে? প্রাসঙ্গিক ব্যাপ্তি-সমীকরণ নির্ণয় কর। এই প্রসঙ্গে শক্-প্রাবল্য এবং ম্যাক-সংখ্যা আলোচনা কর।

শাব্দ প্রাচীর, স্বনোত্তর শক্-তরঙ্গ এবং Sonic bang বলতে কি বোঝ? বহুদূরাগত কামানধ্বনিতে তিনটি পৃথক্ শব্দ শোনা যায়—ব্যাখ্যা কর।

৩। সমসত্ত্ব ও বিষমসত্ত্ব মাধ্যমে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের সরল শ্রেণীবিভাগ কর। ভূকম্প-তরঙ্গ সম্বন্ধে সংক্ষিপ্ত টীকা লিখ।

৪। সন্ততি-সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর। বেগ-বিভব কাকে বলে? ত্রিমাত্রিক তরঙ্গের অবকল সমীকরণের ব্যুৎপত্তিতে এদের ভূমিকা কি কি? বেগ-বিভব এবং অন্যান্য তরঙ্গ-প্রাচলের মধ্যে সম্পর্ক প্রতিষ্ঠা কর।

৫। ত্রিমাত্রিক তরঙ্গের সমীকরণ-প্রতিষ্ঠায় কি কি নীতি, কি কি সর্ত সাপেক্ষে প্রযোজ্য? সমঞ্জস গোলীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রে এই সমীকরণের প্রতিরূপ কিরকম? সেক্ষেত্রে সমীকরণের সমাধান আলোচনা কর।

৬। বেগ-বিভব এবং শাব্দ চাপের পরিপ্রেক্ষিতে গোলীয় তরঙ্গের সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর।

৭। অপসারী গোলীয় তরঙ্গ-ক্ষেত্রে বিশিষ্ট শাব্দ বাধ গণনা কর। তরঙ্গকেন্দ্র থেকে বহুদূরে এবং কাছে এই বাধের রূপ কি-ভাবে বদলায়?

৮। গোলীয় এবং সমতলীয় তরঙ্গে শাব্দ-তীব্রতার মান নির্ণয় কর।

৮

শাব্দ, যান্ত্রিক ও বৈদ্যুতিক উপমিতি

(Mechano-Acoustic-Electric Analogues)

৮-১. সূচনা :

যান্ত্রিক স্পন্দনে শব্দের উৎপত্তি হয় আর স্পন্দন পোষণের আধুনিক ব্যবস্থা, প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ ও চৌম্বকক্ষেত্রের প্রয়োগ। যান্ত্রিক বৈদ্যুতিক ও শাব্দ প্রাচলগুলির মধ্যে ঘনিষ্ঠ উপমিতি থাকাতেই এই প্রযুক্তি সম্ভব হয়েছে। ৩-৭ অনুচ্ছেদেই আভাস দেওয়া হয়েছে যে, পরবশ কম্পনের এবং প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহের সমীকরণ অভিন্নরূপ।

আজকাল শব্দের উৎস এবং চালিত সংস্থার মধ্যে যোজনব্যবস্থা প্রধানত বৈদ্যুত-যান্ত্রিক শ্রেণীর হয়। উদাহরণস্বরূপ, মাইক্রোফোন এবং লাউডস্পীকার যথাক্রমে শব্দের গ্রাহক ও উৎপাদক ; এদের দুয়েরই স্পন্দনশীল ঝিল্লী বিদ্যুৎপ্রবাহ দ্বারা স্পন্দিত হয় এবং তারা শব্দবাহী মাধ্যমের সঙ্গে যুক্ত। মাইক্রোফোনে শব্দতরঙ্গ প'ড়ে ঝিল্লীর কম্পন ঘটায় এবং সেই স্পন্দন প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহে পরিণত হয় ; সেই বিদ্যুৎপ্রবাহের ক্রিয়ায় লাউডস্পীকারের ঝিল্লী স্পন্দিত হয় এবং সেই স্পন্দন বায়ুতে শব্দতরঙ্গের সৃষ্টি করে। অতএব শাব্দ, যান্ত্রিক ও বৈদ্যুতিক প্রতিসাম্য (equivalence), এদের আচরণ ভালোভাবে বুঝতে সাহায্য করে।

এই দুই যন্ত্রের মূল ক্রিয়াপদ্ধতি খুব সংক্ষেপে হচ্ছে—(১) টেলিফোন-গ্রাহকের স্পন্দনক্ষম পর্দা ইস্পাতের পাতলা ঝিল্লী ; তার ঠিক পেছনেই সরু অন্তরিত তার-জড়ানো চুম্বক থাকে। ঝিল্লীর স্পন্দনের ফলে তার সঙ্গে যুক্ত চৌম্বক ফ্লাক্সের প্রত্যাবর্তী পরিবর্তন হতে থাকে ; তাই চুম্বকের উপর জড়ানো তারে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহ আবিষ্ট হয়। এই হচ্ছে মাইক্রোফোনের কাজ। (২) সেই প্রত্যাবর্তী প্রবাহ আর-একটি টেলিফোন-গ্রাহকের চুম্বকের তারের মধ্যে প্রবাহিত হয়ে প্রত্যাবর্তী চৌম্বক ক্ষেত্রের সৃষ্টি করে। ফলে, ঝিল্লীর ওপর আকর্ষণ কমে-বাড়ে এবং তাতে তার স্পন্দন হয়। সেই স্পন্দন বায়ুতে শব্দতরঙ্গ উৎপন্ন করে। এইভাবেই লাউডস্পীকার কাজ করে। এই যন্ত্র দুটিকে তাপবিজ্ঞানে তাপীয় এঞ্জিন ও রেফ্রিজারেটারের মতো মনে করা যায়।

১৫ অধ্যায়ে মাইক্রোফোন ও লাউডস্পীকার ঝিল্লীকে স্পন্দিত করার নানা রীতিনীতি আলোচনা করা হবে। এদের ক্রিয়াপদ্ধতি, আমাদের আলোচ্য তিন শ্রেণীর প্রাচলের উপমিতি সুস্পষ্টভাবেই নির্দেশ করে।

যান্ত্রিক তথা বৈদ্যুতিক উপমিতি কোন স্বনকের শাব্দ আচরণ বোঝাতে সহজেই সক্ষম। বিদ্যুৎশিল্পের তাগিদে বৈদ্যুতিক বর্তনীর তাত্ত্বিক এবং পরীক্ষণের খুঁটিনাটি বিশ্লেষণে বহুদূর এগোনো গেছে। সেইসব তথ্য ও ফল, উপমিতির সুবাদে যান্ত্রিক স্পন্দকতন্ত্রে সরাসরি প্রয়োগ ক'রে অভূতপূর্ব সাফল্য মিলেছে। প্রায় ৫০ বছর আগে ম্যাক্সফিল্ড ও হ্যারিসন গ্রামোফোনে রেকর্ডার এবং সাউণ্ডবক্সের ক্ষেত্রে বৈদ্যুতিক উপমিতি কাজে লাগিয়ে যে অসামান্য সাফল্য এনেছিলেন—তাই দিয়েই এই তুলনামূলক ব্যবস্থাপনার সুরু হয়।

৮-২. বৈদ্যুত-যান্ত্রিক উপমিতি :

৩-৭ অনুচ্ছেদে দেখেছি যে, কোন কণার যান্ত্রিক স্পন্দনের এবং শ্রেণী-সমবায়ে যুক্ত L-C-R বর্তনীতে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎধারার মৌলিক সমীকরণ দুটি অভিন্নরূপ। বোঝার সুবিধার্থে কণাসরণের (ξ) এবং আধানের (q) গতীয় সমীকরণ লেখা হচ্ছে—

$$L\ddot{q}+R\dot{q}+\frac{q}{C}=Ee^{j\omega t}$$

$$m\ddot{\xi}+r_m\dot{\xi}+\frac{\xi}{c_m}=Fe^{j\omega t}$$

[$c_m=1/s$; প্রথমটি নমনীয়তা, দ্বিতীয়টি দার্ঢ্য]

সুতরাং বিদ্যুৎপ্রবাহ $i=\dot{q}=\dfrac{Ee^{j\omega t}}{R+j(\omega L-1/\omega C)}=\dfrac{E}{Z}\,e^{j\omega t}$

আর কণাবেগ $\dot{\xi}=\dfrac{Fe^{j\omega t}}{r_m+j(m\omega-1/\omega c_m)}=\dfrac{F}{Z_m}\,e^{j\omega t}$

বৈদ্যুতিক প্রকরণের অনুকরণে Z_m-কে জটিল যান্ত্রিক বাধ, $m\omega$-কে জাড্য প্রতিক্রিয়তা (inertial reactance) এবং $1/\omega c_m$-কে যান্ত্রিক নমনীয়তা (mechanical compliance) বলা হয়।

প্রত্যক্ষ উপমিতি : এই চারটি সমীকরণ থেকে প্রাপ্ত উপমিতিকে

প্রত্যক্ষ (direct) বলা হয় এবং সেই সাদৃশ্যকে নিম্নলিখিত সারণীর আকারে প্রকাশ করা যায়—

যান্ত্রিক	বৈদ্যুতিক	যান্ত্রিক	বৈদ্যুতিক
বল (f)	বিভবভেদ (e)	যান্ত্রিক রোধ (r_m)	রোধ (R)
সরণ (ξ)	আধান (q)	ভর (m)	আবেশ (L)
গতিবেগ (v)	বিদ্যুৎপ্রবাহ (i)	নমনীয়তা (c_m)	ধারকত্ব (C)

এখন যান্ত্রিক বাধ এবং যান্ত্রিক রোধ কি? যন্ত্রের কোন অংশ যদি প্রযুক্ত বলের ক্রিয়ায় গতিশীল হয় তাহলে সেই বল এবং উক্ত অংশে উৎপন্ন রৈখিক বেগ এই দুইয়ের অনুপাতকে যান্ত্রিক বাধ বলা হয়। তার একক যান্ত্রিক ওহ্‌ম্‌ বা বল/বেগ—CGS পদ্ধতিতে গ্রাম/সে এবং MKS পদ্ধতিতে কিলোগ্রাম/সে।

আবার প্রযুক্ত বলের ক্রিয়ায় যদি কোন যন্ত্রাংশ, বলের সমানুপাতিক বেগে চলে তাহলে তার যান্ত্রিক রোধ আছে বলা হয় এবং এক্ষেত্রেও যান্ত্রিক ওহ্‌ম্‌ তার একক। যান্ত্রিক রোধের উৎপত্তি মাধ্যমের সান্দ্রতা-ধর্ম থেকে হয়।

পরোক্ষ উপমিতি : বৈদ্যুতিক বর্তনীতে ছেদ না ঘটিয়ে বিভবভেদ মাপা যায় (ভোল্টমিটার সমান্তরালে যুক্ত হয়) কিন্তু প্রবাহ মাপা যায় না। আবার যান্ত্রিক সজ্জা না ভেঙে বেগ বা সরণ মাপা যায় (ভারযুক্ত স্প্রিং-এর নর্তন) কিন্তু কার্যকর বল মাপা যায় না। এই দৃষ্টিভঙ্গীতে দেখলে বেগ ও বিভববৈষম্য সদৃশ রাশি আর কার্যকর বল প্রবাহের সঙ্গে তুলনীয়। নিচে সেই উপমিতির সারণী দেওয়া হ'ল—

যান্ত্রিক	বৈদ্যুতিক	যান্ত্রিক	বৈদ্যুতিক
বেগ (v)	বিভবভেদ (e)	ভর (m)	ধারকত্ব (C)
বল (f)	প্রবাহ (i)	নমনীয়তা (C_m)	স্বাবেশ (L)
$\frac{1}{\text{রোধ } (r_m)}$	রোধ (R)	$\frac{1}{\text{বাধ } (Z_m)}$	বাধ (Z)

দুই উপমিতিতে প্রভেদ অনেক, কিন্তু দুয়েতেই ক্ষমতার প্রতিরূপ *ei* এবং *vf* এক। যান্ত্রিক তন্ত্রে পরোক্ষ উপমিতিই গ্রহণীয়।

প্রত্যক্ষ উপমিতিকে বল-বিভবভেদ (force-voltage) বা বাধজাতীয় বলা হয়। পরোক্ষ উপমিতিকে বল-প্রবাহ (force-current) বা সচলতা-জাতীয় (mobility type) বলে।

৮-৩. যান্ত্রিক বর্তনী :

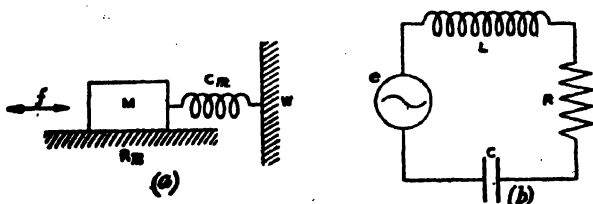
বৈদ্যুতিক শিল্পের তাগিদে বিদ্যুৎবর্তনীতত্ত্বের, অনেককালই, প্রভূত উন্নতি হয়েছে। যেকোন বৈদ্যুতিক সমস্যায়, পর্যবেক্ষণ থেকে বর্তনীর অংকন এবং যথাযোগ্য সমীকরণের উপস্থাপন, সম্ভব। সমাধান থেকে বর্তনীর আচরণ অনুমানও করা যায়। তেমনি অনেক ক্ষেত্রে যান্ত্রিক তন্ত্রেরও নক্‌সা আঁকা যায়; তাকে যান্ত্রিক বর্তনী বলে। তার প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী এঁকে বৈদ্যুতিক আচরণবিধি অনুমান করা হয়। লব্ধ সেই ফলকে যান্ত্রিক প্রাচলে রূপান্তরিত ক'রে পরীক্ষাধীন তন্ত্রের আচরণের প্রকৃতি জানা যায়।

যান্ত্রিক সংস্থায় উপমিতির প্রয়োগরীতি : যান্ত্রিক তন্ত্রে ভর, রোধ বা নমনীয়তা এবং বৈদ্যুতিক বর্তনীতে স্বাবেশ, রোধ এবং ধারকত্ব, উপমিতি বিচারকালে এক এক জায়গায় সংহত বা পুঞ্জীভূত থাকে ব'লে ধরা নেওয়া হয়। সংযোজনের মাধ্যম যেমন বায়ু বা রড বা তারেরও এইসব প্রাচলগুলি থাকে—তাদের কিন্তু উপেক্ষাই করা হয়; অর্থাৎ সাধারণ-ভাবে যান্ত্রিক ও বৈদ্যুতিক বর্তনীতে প্রাচলগুলি পুঞ্জীভূত (lumped) ব'লে ধরা হয়, বণ্টিত (distributed) ব'লে নয়। যান্ত্রিক ক্ষেত্রে বৈদ্যুতিক উপমিতি প্রয়োগ করতে গেলে, প্রথমে নির্ণেয়—কারা কারা শ্রেণী-সমবায়ে আছে, কারা কারাই বা সমান্তরালে। বৈদ্যুতিক বর্তনীতে (*i*) শ্রেণী-সমবায়ে একই প্রবাহ যায় কিন্তু বিভববৈষম্য ভাগ হয়, আর (*ii*) সমান্তরাল সমবায়ে বিভববৈষম্য সব অংশেই সমান কিন্তু বিদ্যুৎপ্রবাহ ভাগ হয়। তুলনা ক'রে যান্ত্রিক বর্তনীতে কার্যকরী নীতি হিসাবে ধরা যায়—

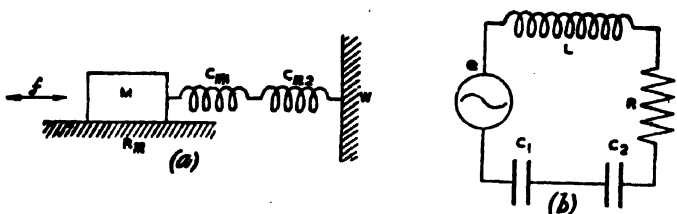
(ক) যদি নানা অংশের বেগ বা সরণ সমান হয়, অর্থাৎ কার্যকরী বল ভাগ হয়ে থাকে তবে তাদের বৈদ্যুতিক প্রতিসমগুলি শ্রেণী-সমবায়ে থাকবে।

(খ) যদি একই বলের ক্রিয়ায় অংশগুলিতে আলাদা আলাদা বেগ বা সরণ উৎপন্ন হয় তবে বৈদ্যুতিক প্রতিসমগুলি সমান্তরাল সমবায়ে থাকবে।

এই কার্যকর নীতি প্রত্যক্ষ উপমিতির ভিত্তিতে স্থিরীকৃত।

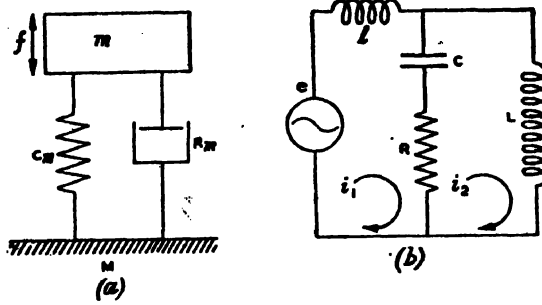
কয়েকটি উদাহরণ : (১) 8.1 (a) চিত্রে M ভরের এক বস্তুকে c_m নমনীয়তার এক স্প্রিং দিয়ে দেওয়াল W-এর সঙ্গে দৃঢ়ভাবে আটকানো। প্রত্যাবর্তী বল f-এর ক্রিয়ায় তার পরবশ কম্পন হবে। সেই স্পন্দনে

চিত্র 8.1—স্প্রিং-যুক্ত ভরের স্পন্দনের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী

ভরের পথ, R_m পরিমাণ বাধা বা রোধ প্রয়োগ করবে। চিত্র 8.1 (b) এরই প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী। তাতে ভর, বাধা ও নমনীয়তার বৈদ্যুতিক প্রতিসমগুলি L, R এবং C শ্রেণী-সমবায়ে যুক্ত দেখানো হয়েছে।

8.2 চিত্রে ভরটিকে দুটি স্প্রিং দিয়ে বেঁধে পরবশ স্পন্দনের যান্ত্রিক ও প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী দেখানো হয়েছে। এখানে স্প্রিং-দুটি শ্রেণীযুক্ত দুই

চিত্র 8.2—দুইটি স্প্রিং-যুক্ত ভরের স্পন্দনের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী

ধারকের অনুরূপ। স্প্রিং-দুটি ভরের দু'দিকে লাগানো থাকলে কিন্তু সমান্তরালে যুক্ত দুই ধারকের অনুরূপ আচরণ ঘটতো।

(২) বৈদ্যুতিক পাম্প বা মোটর চললে ঘরের মেজে কাঁপে ; টাইপরাইটারে কাজ করলে টেবিল নড়ে, যথেষ্ট অবাঞ্ছিত শব্দও হয়। এদের নিজস্ব কম্পন মেজে বা টেবিলে পৌঁছে এইসব ঘটায়। এই পরবশ স্পন্দন বা শব্দ কমানোর জন্য ব্যবস্থা করতে এদের অনেক সময় রাবার বা ফাইবার-কাচের নরম প্যাডের ওপরে রাখা হয়। প্যাড স্প্রিং-এর কাজ করে। ধরা যাক, যন্ত্রের ভর m,

প্যাডের নমনীয়তা c_m, তার স্পন্দনে আনুষঙ্গিক সৃষ্ট বাধা R_m, আর মেজের ভর M (8.3a চিত্র) ; তাদের বৈদ্যুতিক প্রতিসম যথাক্রমে l, C, R এবং

চিত্র 8.3—টাইপরাইটারের প্রতিসম যান্ত্রিক ও বৈদ্যুতিক বর্তনী

L এবং তাদের সজ্জাও দেখানো হয়েছে। যন্ত্রে উৎপন্ন প্রত্যাবর্তী বল f-এর ক্রিয়ায় m এবং M-এর বেগ যথাক্রমে v_1 এবং v_2 ; তারা, বৈদ্যুতিক বর্তনীতে দুই অংশের জালিপ্রবাহ (mesh current) যথাক্রমে i_1 এবং i_2-র প্রতিসম। জালি-দুটিতে রোধ এবং নমনীয়তা সাধারণ প্রাচল।

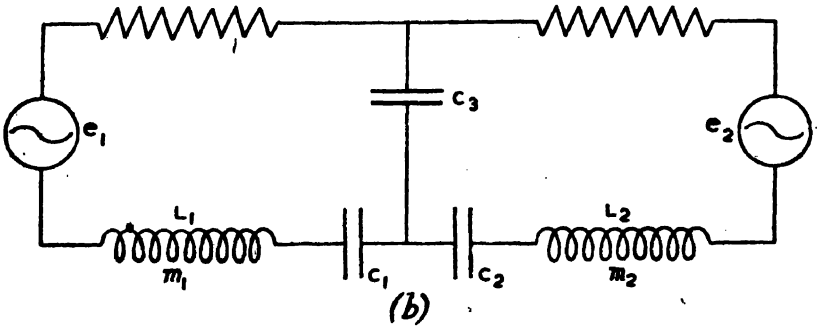
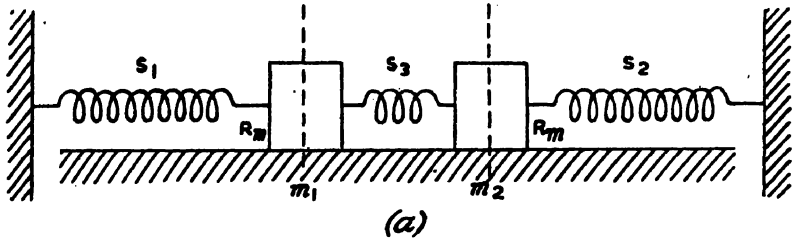
জালিতে Kirchchoff-এর দ্বিতীয় সূত্র প্রয়োগ করলে মিলবে

$$\frac{i_2}{i_1}=\sqrt{\frac{R^2+(1/\omega C)^2}{R^2+(\omega L-1/\omega C)^2}}$$

সুতরাং তুলনা থেকে পাব

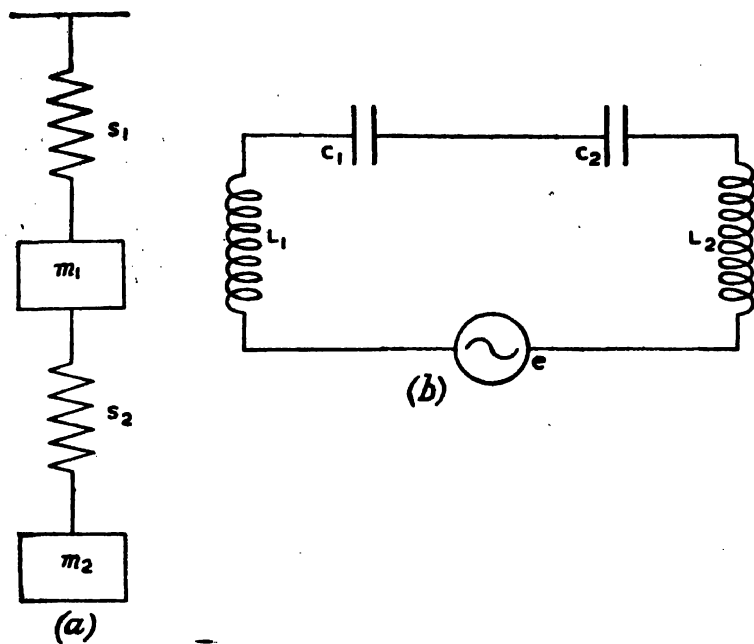
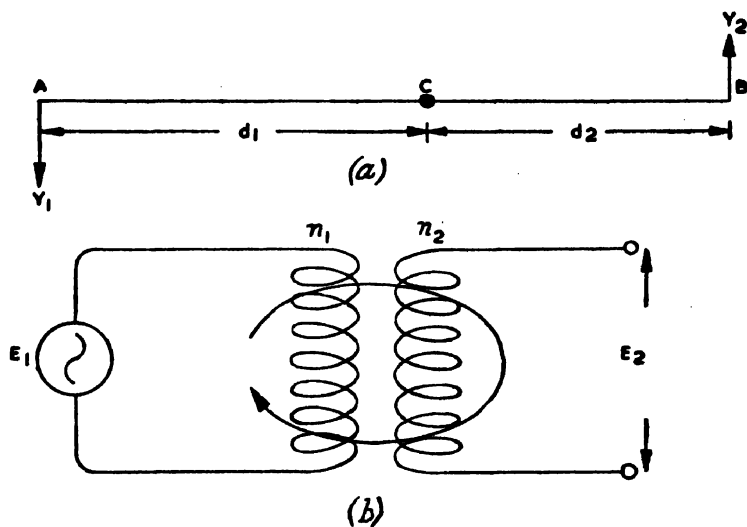
$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2=\frac{r_m{}^2+(1/\omega c_m)^2}{r_m{}^2+(\omega M-1/\omega c_m)^2}$$

v_2/v_1 যত কম, মেজেতে শক্তি ততই কম পরিবাহিত হবে ; এখন $\omega M=1/\omega c_m$ হলে, v_2/v_1-এর মান চরম। তখন $\omega=\sqrt{1/Mc_m}$ $=\omega_0$ (অদমিত কম্পাংক) হবে। যতই $(\omega-\omega_0)$ বাড়তে থাকবে ততই v_2/v_1 কমতে থাকবে। সুতরাং ω_0 কমাতে হলে c_m-কে বাড়াতে হবে। আবার ω খুব বেশী হলে, $v_2/v_1=r_m/\omega M$ হবে ; কেননা m/M নগণ্য রাশি। সুতরাং উচ্চ কম্পাংকে মেজেতে পরিবাহিত শক্তি কমাতে হলে, r_m ছোট করতে হবে ; অর্থাৎ যন্ত্রের আধার হিসাবে শক্ত স্প্রিং ব্যবহার ক'রে যান্ত্রিক গোলমাল কমানো সম্ভব।

(৩) 8.4 চিত্রে m_1 এবং m_2 দুটি ভর s_1 এবং s_2 স্প্রিং দিয়ে দেওয়ালের সঙ্গে দৃঢ়ভাবে আটকানো। s_3 স্প্রিং তাদের মধ্যে যোজন রচনা করছে। তাদের যুগ্ম স্পন্দন হলে, বৈদ্যুতিক প্রতিসম বর্তনী কিরকম হবে তাও দেখানো

চিত্র 8.4—স্প্রিং-যুক্ত যুগ্ম স্পন্দক ও প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী

হয়েছে। এখানে স্পন্দন বাধা-যুক্ত। এর প্রতিসম বর্তনীতে দুটি প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ e_1 এবং e_2 চালিত L-C বর্তনী তৃতীয় একটি C-র মাধ্যমে পরস্পর যুক্ত। s_2 স্প্রিং খুলে নিলে এবং হাওয়ায় কম্পন হলে কি পরিবর্তন হবে, 8.5 চিত্রে দেখানো হয়েছে। তখন C_2 এবং e_2 থাকবে না; বাধা তথা রোধও নেই ধরা চলে।

(৪) যান্ত্রিক ব্যবস্থায়, লেভার বল বিবর্ধন করতে ব্যবহার হয়। 8.6 (a) চিত্রে C বিন্দু সাপেক্ষে AC অংশের A প্রান্তে F_1 বল প্রয়োগ করলে BC-র B প্রান্তে F_2 বলের উদ্ভব হয়। দ্বন্দ্বের (moment) নীতি থেকে $F_1 . d_1 = F_2 \, d_2$ হয়। দ্বন্দ্ব যদি দুই প্রান্তবিন্দুতে $\dot{y}_1$ এবং $\dot{y}_2$ রৈখিক বেগ উৎপন্ন করে তাহলে $\dot{y}_1/\dot{y}_2 = d_2/d_1$ হবে।

চিত্র 8.5—একটি স্প্রিং-চালিত যুগ্ম স্পন্দক

এখন লেভার দিয়ে এক যান্ত্রিক তন্ত্র থেকে অন্য যান্ত্রিক তন্ত্রে বল চালান করা বা ইচ্ছামতো বাহু ছোট-বড় ক'রে উদ্ভূত বলকে কম বা বেশী করা যাবে।

চিত্র 8.6—যান্ত্রিক লেভার ও প্রতিসম বর্তনী

তার প্রতিসম বৈদ্যুতিক ব্যবস্থা, পরস্পর (mutual) আবেশ দিয়ে যুক্ত দুটি আবেশকুণ্ডলী বা ট্রান্সফর্মার [8·6 (b) চিত্র]। দুই কুণ্ডলীর পাক-সংখ্যা n_1 এবং n_2 হলে এবং প্রবাহ i_1 ও i_2 হলে, $i_1/i_2 = n_2/n_1$; আর প্রযুক্ত এবং আবিষ্ট বিদ্যুচ্চালক বল E_1 এবং E_2 হলে, $E_1/E_2 = n_1/n_2$; অর্থাৎ n_2-কে ইচ্ছামতো বাড়িয়ে-কমিয়ে আবিষ্ট E_2-কে বাড়ানো-কমানো যাবে। এখন $d_1/d_2 \equiv n_2/n_1$ হলে, প্রত্যক্ষ উপমিতি এবং $d_1/d_2 \equiv n_1/n_2$ হলে, পরোক্ষ উপমিতি সম্পূর্ণ হয়। [লক্ষ্য কর, $d_1/d_2 = \dot{y}_2/\dot{y}_1$ এবং $n_1/n_2 = E_1/E_2$]

৮-৪. শাব্দ-যান্ত্র উপমিতি :

৩-৭ অনুচ্ছেদে কণার স্পন্দনে যান্ত্রিক বাধ, রোধ এবং প্রতিক্রিয়তার ভূমিকা আলোচনা করা হয়েছে। তাদের প্রতিসম বৈদ্যুতিক রাশিগুলির পরিচয়ও পেয়েছি। যেমন বিদ্যুৎপ্রবাহ = প্রযুক্ত প্রত্যাবর্তী বিদ্যুচ্চালক বল/বৈদ্যুতিক বাধ, অনুরূপে কণাবেগ = প্রযুক্ত প্রত্যাবর্তী বল/যান্ত্রিক বাধ। সমতলীয় তরঙ্গের ব্যাপ্তি আলোচনায় ৬-৬.৬ থেকে পাচ্ছি, কণাবেগ = শাব্দ চাপ/বিশিষ্ট বাধ। এখন কোন স্বনক বা শব্দগ্রাহকের আচরণ তার যান্ত্রিক ও বৈদ্যুতিক উপমিতি থেকে স্পষ্ট হয়। প্রয়োজনীয় শাব্দরাশিগুলি নিচের তালিকায় দেওয়া গেল ; এদের কয়েকটিকে আমরা ৬ অধ্যায়ে পেয়েছি।

(ক) শাব্দ চাপ (p) : ৬-২ অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে যে শব্দতরঙ্গ যাওয়া কালে মাধ্যমে বিক্ষুব্ধ এবং স্বাভাবিক অবস্থায় চাপের যে অন্তরফল তাকেই বাড়তি (excess) বা শাব্দ চাপ বলে। শাব্দ ক্ষেত্রে S ক্ষেত্রফলের ওপর শাব্দচাপজনিত প্রত্যাবর্তী বলের মান

$$f = pS \qquad (৮\text{-}৪.১)$$

(খ) আয়তন বেগ (U) : শব্দতরঙ্গ চলাকালে কোন নির্দিষ্ট ক্ষেত্রফলের মধ্য দিয়ে মাধ্যমের যতখানি আয়তন প্রতি সেকেণ্ডে যায়, তাকে আয়তন-বেগ বা আয়তন-প্রবাহ বলে। সেই ক্ষেত্রের লম্ব বরাবর কণাবেগের উপাংশ (v) এবং ক্ষেত্রফলের গুণফল দিয়ে আয়তন-বেগ মাপা হয়।

$$U = Sv \qquad (৮\text{-}৪.২)$$

(গ) আপেক্ষিক শাব্দ-বাধ (Z_s) : শব্দবাহী মাধ্যমের কোন বিন্দুতে

শাব্দচাপ এবং কণাবেগের জটিল অনুপাতকে আপেক্ষিক শাব্দ-বাধ (৬-৬ অনুচ্ছেদ) বলে।

$$Z_s = p/v \quad (৮\text{-}৪.৩)$$

সেই বিন্দুর অবস্থান কোন যন্ত্রের মধ্যেও হতে পারে। এর এককের (dyne-sec/cc) নাম র‍্যাল বা mks-র‍্যাল (newton-sec/m^3)।

বিশিষ্ট বাধ : একে অনেকসময় মাধ্যমের নিহিত (intrinsic) বা বিকিরণ-বাধও বলা হয়। এই প্রাচল আপেক্ষিক শাব্দ-বাধের এক বিশেষ রূপ। সচল সমতলীয় তরঙ্গে এর মান Z_s $(=\rho_0 c)$-এর সমান।

মাধ্যমে সমতলীয় শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তি এবং প্রত্যাবর্তী প্রবাহবাহী বিদ্যুৎ-বর্তনীর মধ্যে সাদৃশ্য আছে। ব্যাপ্তি অভিমুখের সমকোণে এক ক্ষেত্রের কোন এক বিন্দুতে যা ঘটে, তার সঙ্গে গোটা বর্তনীতে যা ঘটে তার তুলনা করা চলে। সেই বিন্দুতে শাব্দ চাপ (p) এবং কণাবেগ (v), বর্তনীতে যথাক্রমে সক্রিয় বিদ্যুচ্চালক বল (e) এবং প্রবাহের (i) সঙ্গে তুলনীয়। কাজেই বৈদ্যুতিক বাধ $Z=e/i$ এবং আপেক্ষিক শাব্দ-বাধ $Z_s=p/v$; কিন্তু Z বর্তনীর দুই বিন্দুর মধ্যবর্তী অংশের ধর্ম, অথচ Z_s মাধ্যমের একটি বিন্দুর ধর্ম।

সাদৃশ্য আরও আছে। ei যেমন নিমেষ বৈদ্যুতিক ক্ষমতা, pv তেমনি সেই বিন্দুতে নিমেষ শাব্দ-ক্ষমতা সূচিত করে ; কিন্তু ei হচ্ছে e বিভবভেদের দরুন বর্তনীতে উদ্ভূত ক্ষমতা, আর মাধ্যমের ঐ বিন্দুতে একক ক্ষেত্রফলের মধ্যে দিয়ে লম্বভাবে শক্তি অতিক্রান্ত হওয়ার সময়-হার vp দিয়ে নির্দিষ্ট হয়।

আপেক্ষিক বা বিশিষ্ট শাব্দ-বাধকে ($\rho_0 c$) তুলনা করা চলে (১) স্বচ্ছ মাধ্যমে আলোর প্রতিসরাংক n-এর সঙ্গে, (২) দ্বিবৈদ্যুত (dielectric) মাধ্যমে বিদ্যুচ্চুম্বকীয় তরঙ্গের তরঙ্গ-বাধ $\sqrt{\mu/\varepsilon}$-এর সঙ্গে কিম্বা (৩) বৈদ্যুতিক পরিবহণ (transmission) লাইনের বিশিষ্ট বাধ Z_0-র সঙ্গে।

জটিল আপেক্ষিক শাব্দ-বাধ : শব্দতরঙ্গ সমতলীয় এবং সচল না হলে, p এবং v আর সমদশা হয় না। ৭-১৩ এবং ৭-১৪ অনুচ্ছেদে গোলীয় তরঙ্গের বেলায় তা-ই হতে দেখেছি। অনুরূপ ব্যাপার স্থাণু তরঙ্গে বা মাধ্যমের সীমাতলেও ঘটে। তখন p/v অনুপাতকে

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (৮\text{-}৪.৪)$$

এই জটিল আকারে প্রকাশ করা হয়। তখন R_s আপেক্ষিক শাব্দ-রোধ এবং X_s আপেক্ষিক শাব্দ-প্রতিক্রিয়তা। অসীম মাধ্যমে সমতলীয় তরঙ্গে

$Z_s = R_s = \rho_0 c$ অর্থাৎ Z_s তখন বাস্তব এবং মাধ্যমের স্বাভাবিক ঘনত্ব × শব্দবেগ = শাব্দ রোধ। কাজেই এইজাতীয় তরঙ্গ এবং বিশুদ্ধ রোধযুক্ত প্রত্যাবর্তী বর্তনীর মধ্যে আরও সাদৃশ্য মেলার কথা। ৬-৬.৬ এবং ৬-৬.৭ মিলিয়ে $I = \frac{1}{2}\rho_0 c v_m^2$ আর প্রত্যাবর্তী বর্তনীতে ক্ষমতা $P = ei = Ri^2 = \frac{1}{2}Ri_m^2$; I এবং P দুই-ই শক্তি অতিবাহিত হওয়ার সময়-হার, তাই $\rho_0 c$ এবং R তুলনীয় প্রাচল হবে।

(ঘ) শাব্দ বাধ : আপেক্ষিক শাব্দ-বাধ (Z_s) শব্দবাহী মাধ্যমের বিন্দুধর্ম (point property) আর শাব্দ বাধ তার তল বা ক্ষেত্র (area)-ধর্ম। শব্দবাহী মাধ্যমের শাব্দ বাধ (Z_a) বলতে ঐ তলের ওপর গড় শাব্দচাপ আর সেই তল অতিক্রামী আয়তন-বেগ (U)-এর জটিল অনুপাতকে বোঝায়।

অর্থাৎ
$$Z_a = p/U = \frac{p}{Sv} = \frac{Z_s}{S} = \frac{\rho_0 c}{S} \qquad (৮\text{-}৪.৫)$$

শাব্দ-ওহ্‌ম্ (=dyne-sec/cm⁵) বা mks শাব্দ-ওহ্‌ম্ (newton-sec/m⁵) হচ্ছে এর একক। Z_s-এর মতোই $Z_a = R_a + jX_a$ হবে। শাব্দ রোধের দরুনই জালি বা কৈশিক নলের মধ্যে দিয়ে গ্যাসের সান্দ্র প্রবাহ ঘটলে শক্তির অপচয় হয়। সাধারণভাবে এর মান ধ্রুবক এবং শাব্দ বাধের সমমাত্রক। l দৈর্ঘ্য এবং r ব্যাসার্ধের কৈশিক নলের মধ্যে p চাপের দরুন সান্দ্রপ্রবাহে আয়তন-বেগ $U = \pi p r^4/8\eta l$ হবে। সুতরাং সেক্ষেত্রে শাব্দ-রোধ দাঁড়াবে

$$R_a = p/U = 8\eta l/\pi r^4 \qquad (৮\text{-}৪.৬)$$

শাব্দ বাধ এবং যান্ত্রিক বাধের মধ্যে সম্পর্ক :

$$Z_m = \frac{f}{v} = \frac{pS}{v} = SZ_s = S^2 Z_a \qquad (৮\text{-}৪.৭)$$

(ঙ) শাব্দ-ভর বা জড়তা (Acoustic inertance) : ধরা যাক, অপ্রশমিত বলের ক্রিয়ায় খানিকটা প্রবাহী ত্বরিতগতি হ'ল কিন্তু তার সংকোচন নগণ্য। প্রবাহীর ভর যদি m এবং বেগ v হয়, তাহলে সেই ভরের গতিশক্তি হবে

$$\text{K.E.} = \tfrac{1}{2}mv^2 = \tfrac{1}{2}m(Sv)^2/S^2 = \tfrac{1}{2}M_a U^2 \qquad (৮\text{-}৪.৮)$$

$M_a\,(=m/s^2)$ শাব্দ-জাড্য এবং U আয়তন-বেগ ; অর্থাৎ কোন রন্ধ্রপথের শাব্দ-জাড্য বলতে, সেই পথে প্রবাহীর ভর এবং তার ক্ষেত্রফলের বর্গ এই দুইয়ের

অনুপাতকে বোঝায়। এই কাল্পনিক প্রাচলের ধারণার প্রধান সর্ত হল যে, বিনা সংকোচনে প্রবাহীর ত্বরণ হতে হবে। কোন আবেশকের চৌম্বক শক্তির মাপ $\frac{1}{2}Li^2$; প্রত্যক্ষ উপমিতিতে বেগ এবং প্রবাহমাত্রা প্রতিসম। সুতরাং যান্ত্রিক জাড্যের মতো শাব্দ জাড্যও স্বাবেশের প্রতিসম।

শাব্দ-জাড্যের একক—গ্রাম/সেমি^{4} বা কেজি-মি$^{-4}$।

(চ) শাব্দ নমনীয়তা (Acoustic Compliance) : কোন প্রবাহীর বিনা ত্বরণে আয়তনের সংকোচন, তার শাব্দ নমনীয়তা চিহ্নিত করে। মোট বলসংস্থার ক্রিয়ায় কোন প্রবাহীর আয়তন কমবে কিন্তু তার ভরকেন্দ্রের স্থানচ্যুতি হবে না—এই ব্যাপারই শাব্দ-নমনীয়তা ধর্ম নির্দেশ করে। ধর্ম হিসাবে এটি শাব্দ-জাড্যের উল্টো বলা চলে।

কোন গহ্বরের শাব্দ ধারকত্ব তথা শাব্দ নমনীয়তা বলতে আয়তন-সংকোচন/সক্রিয়-চাপ অনুপাত টিকে বোঝায়। গহ্বরের বায়ুর ওপর চাপ প্রয়োগ করলে, হুকের সূত্রানুসারে

$$p = K\delta V/V_0$$

$$C_a = \frac{\delta V}{p} = \frac{V_0}{K} = \frac{V_0}{\rho_0 c^2} \qquad (৮\text{-}৪.৯)$$

এর একক সেমি^{5}/ডাইন বা মি^{5}/নিউটন।

(ছ) আয়তন-সরণ : S প্রস্থচ্ছেদের এক-মুখ-বন্ধ বেঁটে নলে শাব্দ চাপের ক্রিয়ায় যদি কণা-সরণ হয় ξ, তাহলে ধরা যায়, নলে প্রতিটি কণারই একই সরণ হয়েছে। তখন সেই নলে বায়ুর আয়তন-পরিবর্তন হবে $\delta V = S\xi$; আগের রাশির নজির টেনে বলা যায় যে আয়তন-সরণ

$$X = S\xi$$

যান্ত্রিক, বৈদ্যুতিক ও শাব্দ প্রাচলগুলির প্রত্যক্ষ উপমিতি :

যান্ত্রিক	বৈদ্যুতিক	শাব্দ
প্রযুক্ত বল (f)	বিভবভেদ (e)	শাব্দ চাপ (p)
সরণ (x)	আধান (q)	আয়তন-সরণ ($S\xi$)
বেগ (v)	বিদ্যুৎপ্রবাহ (i)	আয়তন-বেগ (U)
রোধ (r_m)	রোধ (R)	শাব্দ-রোধ (R_a)
নমনীয়তা (c_m)	ধারকত্ব (C)	শাব্দ নমনীয়তা (C_a)
ভর (m)	স্বাবেশ (L)	শাব্দ-জাড্য (M_a)

মনে রাখা যেতে পারে যে, যথাক্রমে কারণ এবং ফলের ভূমিকা পালন করে

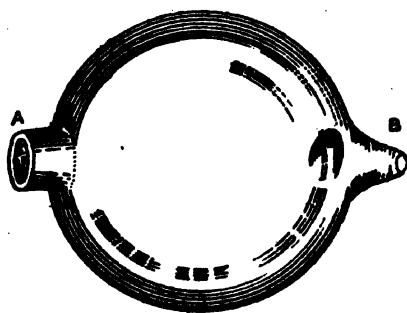
(১) যান্ত্রিক স্পন্দনে বল এবং কণাবেগ ;

(২) বৈদ্যুতিক বর্তনীতে বিভবভেদ এবং তড়িৎধারা ;

(৩) শাব্দ কম্পনে শাব্দ-চাপ এবং আয়তনবেগ।

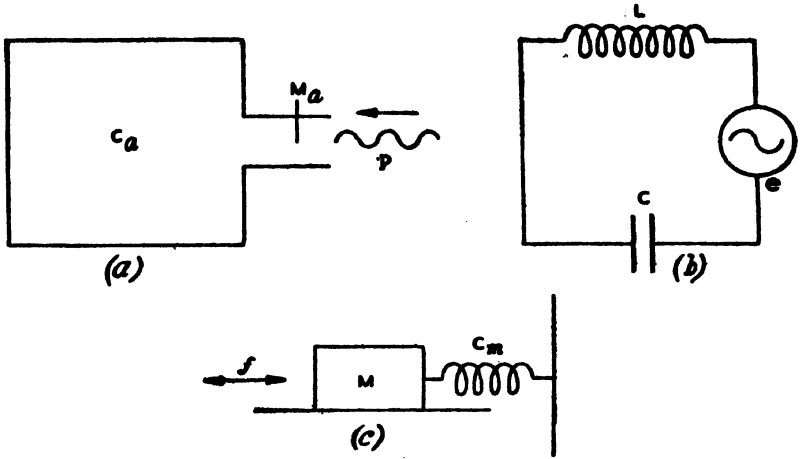
শাব্দ বর্তনী ঃ মৌল শাব্দ-উপাদানগুলি সঠিকভাবে চিহ্নিত করা কঠিন, কেননা এই প্রাচলগুলি সাধারণত বণ্টিত থাকে, যান্ত্রিক বা তাড়িৎ-উপাদানের মতো পুঞ্জীভূত নয়। তাই যান্ত্রিক বর্তনীর তুলনায় শাব্দ-বর্তনী-আঁকা আরও কঠিন। তালিকাভুক্ত উপমিতিগুলি অনুনাদক, শাব্দ ফিল্‌টার মাইক্রোফোন, লাউডস্পীকার, সাউণ্ডবক্স প্রভৃতি শাব্দযন্ত্রে প্রযোজ্য। এদের মধ্যে মাত্র প্রথম দুটিতেই শাব্দ-বর্তনী চিহ্নিত করা যায়। অন্যগুলিতে যান্ত্র ও তড়িৎ-বর্তনীর উপাদানও রয়েছে। কাজেই তাদের বেলায় বিশ্লেষণ জটিলতর। আমরা প্রথম দুটির শাব্দ-বর্তনী ও প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী আলোচনা ক'রবো।

৮-৫. হেল্‌ম্‌হোলৎজ্‌ অনুনাদক (চিত্র 8.7) ঃ

এই যন্ত্রটির মোট তিনটি অংশ—মোটামুটি বড় ফাঁপা বায়ুপূর্ণ গোলক, এক মুখে স্বল্পদীর্ঘ মোটা নল A, অন্য মুখে একটি ছিদ্র B। এর ক্রিয়া শাব্দ-যান্ত্র বা শাব্দ-তাড়িৎ উপমিতির সরলতম উদাহরণ।

চিত্র 8.7—সরল হেল্‌ম্‌হোলৎজ্‌ অনুনাদক

সাধারণত যে শব্দতরঙ্গ ব্যবহৃত হয় তার দৈর্ঘ্যের তুলনায় অনুনাদক, মাপে ছোটই থাকে। সেসব ক্ষেত্রেই কেবল শাব্দ উপাদানগুলিকে থোক বা পুঞ্জীভূত ব'লে ধরা যায়, অর্থাৎ M_a, C_a এবং R_a আলাদা আলাদা ক'রে গণ্য করা যায়। 8.8 (a), (b), (c) চিত্রে অনুনাদকের যথাক্রমে শাব্দ, তাড়িৎ এবং

যান্ত্রিক বর্তনী দেখানো হয়েছে। প্রতিসাম্য থেকে দেখা যাচ্ছে যে অনুনাদক, শাব্দ-জাড্য এবং নমনীয়তার এক শ্রেণী-সমবায় শাব্দ-বর্তনী। প্রতিসম তড়িৎ-

চিত্র ৪.৪—অনুনাদকের প্রতিসম শাব্দ, বৈদ্যুতিক ও যান্ত্রিক বর্তনী

বর্তনী একটি L-C বর্তনী। সুতরাং বৈদ্যুতিক স্পন্দনের মূল কম্পাংক হবে $1/2\pi\sqrt{LC}$; কাজেই অনুনাদকের মূল স্পন্দনাংক হবে

$$n_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_a C_a}} \qquad (৮\text{-}৫.১)$$

এবারে শাব্দ ভর M_a এবং শাব্দ-নমনীয়তা C_a-র মান বার করতে হবে। m-এর ওপর দীর্ঘ শব্দতরঙ্গ পড়লে শাব্দচাপ নলের বায়ুতে ত্বরণ সৃষ্টি করবে। যেহেতু এই বায়ু স'রে অনায়াসে গহ্বরে ঢুকতে পারে বা নল থেকে বেরিয়ে যেতে পারে, সেইহেতু এই পরিমাণ বায়ুর বিনা সংকোচনে ত্বরণ রয়েছে। সুতরাং তার শাব্দ-জড়তা থাকবে।

$$\therefore\ M_a = m/S^2 = \rho_0 lS/S^2 = \rho_0 l/S \qquad [\text{৮-৪.৮ দেখ}]$$

ρ_0 এখানে নলে বায়ুর স্বাভাবিক ঘনত্ব, l নলের দৈর্ঘ্য, S তার প্রস্থচ্ছেদ।

আবার শাব্দ চাপের ক্রিয়ায় গহ্বরের বায়ুর নড়ার জায়গা নেই কিন্তু সংকোচন হবে, অর্থাৎ সেই বায়ুর শাব্দ নমনীয়তা রয়েছে। তাহলে ৮-৪.৯ অনুযায়ী

$$C_a = V_0/\rho_0 c^2$$

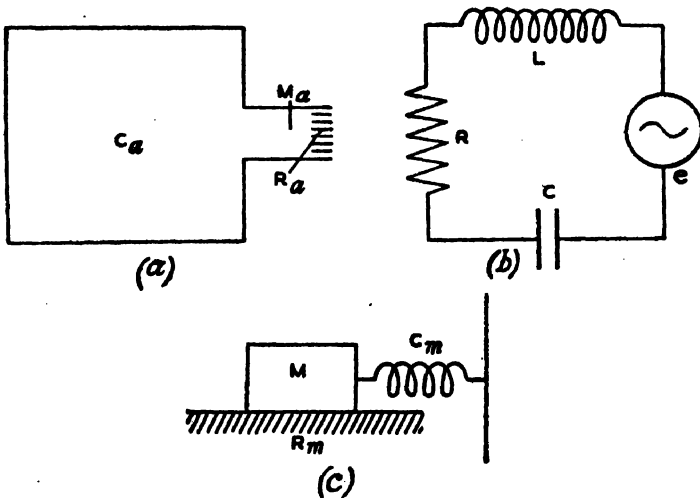
তাহলে শাব্দ-বৈদ্যুত প্রতিসাম্য থেকে

$$n_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_a C_a}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{\rho_0 l}{S}\cdot\frac{V}{\rho_0 c}}}$$

$$= \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV_0}} \qquad (৮\text{-}৫.২)$$

আবার শাব্দ-যান্ত্রিক প্রতিসাম্য থেকে, $m \equiv M_a$ এবং $s \equiv 1/c_m$ ব'লে

$$n_0 = \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{s}{m}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_a C_a}} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV_0}}$$

অবদমনের প্রভাব : ৮-৫.২-তে ধরা হয়েছে যে নলের মধ্যে বায়ুর স্পন্দন অবাধ। কিন্তু তা তো নয়, সেই স্পন্দন (১) ঘর্ষণ ও সান্দ্রতাজনিত বাধা এবং (২) নলমুখ থেকে শব্দের বিকিরণের ফলে অবদমিত হয়। অপেক্ষাকৃত

চিত্র 8.9—অবদমনসহ অনুনাদকের প্রতিসম বর্তনীগুলির রূপ

মোটা নলে দ্বিতীয় কারণে ক্ষয়, প্রথমের তুলনায় নগণ্য হয়। ধরা যাক, R_a মোট অবক্ষয়-গুণাংক ; 8.9 চিত্রে যথোপযুক্ত বর্তনীগুলি দেখানো হয়েছে।

প্রত্যাবর্তী তড়িৎ-বর্তনীতে স্পন্দন হতে হলে নিচের সর্তগুলি চাই—

(১) $1/LC > R^2/4L^2$; এবং (২) মূল কম্পাংক

$$n_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{4L^2}}; \quad \text{(৩) অনুনাদী কম্পাংক } n_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

প্রতিসাম্য থেকে শাব্দ স্পন্দনের জন্য সমীকরণ হিসাবে বসানো যায়

$$\text{মূল শাব্দ-কম্পাংক } n_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{M_aC_a}-\frac{R_a^2}{4M_a^2}}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c^2S}{lV_0}-\frac{p^2/S^2v^2}{4\rho_0^2l^2/S}}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c^2S}{lV_0}-\frac{(Z_s)_a^2}{4\rho_0l^2}}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c^2S}{lV_0}-\frac{\rho_0^2c^2}{4l^2\rho_0^2}}$$

$$= \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV_0}-\frac{1}{4l^2}}$$

$$= \frac{c}{2\pi l}\sqrt{\frac{4Sl-V_0}{4V_0}} \qquad (৮\text{-}৫.৩)$$

$$\text{এবং অনুনাদী কম্পাংক } n_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_aC_a}}$$

$$= \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV_0}}$$

১৪-১১ অনুচ্ছেদে বিস্তারিতভাবে যান্ত্রিক স্পন্দন আলোচনা ক'রে আমরা ৮-৫.২ ও অন্যান্য সমীকরণ ব্যুৎপন্ন ক'রবো।

৮-৬. শাব্দ বাধঃ গাণিতীয় আলোচনাঃ

সচল সমতলীয় তরঙ্গের ক্ষেত্রে ৮-৪.৫-এ দেখছি, শাব্দ বাধ $Z_a=\rho_0c/S$; বিশিষ্ট শাব্দ বাধ $Z_s=\rho_0c$ (৬-৬.৭) ব'লে একে একক ক্ষেত্রফলের শাব্দ বাধও বলতে পারি। ৭-১৩.৩ সমীকরণে বিশিষ্ট শাব্দ বাধ জটিল রাশি, তার মান

$$Z_s = c\rho_0\left(\frac{\beta^2r^2}{1+\beta^2r^2}+j\frac{\beta r}{1+\beta^2r^2}\right)$$

তার রোধ এবং প্রতিক্রিয়তা দুই অংশই আছে। আবার ৮-৪.৭ থেকে দেখছি যে যান্ত্রিক বাধ/শাব্দ বাধ অনুপাত, ক্ষেত্রফলের বর্গের সমান।

এখন প্রত্যাবর্তী শাব্দ চাপের চরম মান p_m ধরলে, লেখা যাবে, শাব্দ বাধ

$$Z_a = \frac{p}{U} = \frac{p_m \cos \omega t}{\dot{X}} \qquad [\ X = \text{আয়তন-সরণ}\ ] \qquad (৮\text{-}৬.১)$$

এখন ধরা যাক, S প্রস্থচ্ছেদের এক নলে আদর্শ গ্যাস আছে, অর্থাৎ সে সান্দ্রতাহীন। ধরা যাক, তার ভর m এবং তার দার্ঢ্য গুণাংক s ; এই গ্যাসের ওপর প্রত্যাবর্তী বল $F \cos \omega t$ প্রয়োগ করলে গ্যাসের গতির সমীকরণ হবে

$$m\ddot{\xi} + s\xi = F \cos \omega t \quad \text{বা } m\ddot{\xi} + \frac{\xi}{C_a} = F \cos \omega t \qquad (৮\text{-}৬.২)$$

এখন আয়তন-সরণ $X = \xi S$; সুতরাং $\ddot{\xi} = \ddot{X}/S$, আর $F = p_0 S$; তাহলে ৮-৬.২ দাঁড়াবে

$$\frac{m}{S}\ddot{X} + \frac{s}{S}X = p_0 S \cos \omega t$$

$$\text{বা} \quad \frac{m}{S^2}\ddot{X} + \frac{s}{S^2}X = p_0 \cos \omega t \qquad (৮\text{-}৬.৩)$$

(১) ভরের (m) তুলনায় দার্ঢ্য s নগণ্য হলে $m \gg s$; তখন

$m\ddot{X}/S^2 = p_m \cos \omega t$; সমাকলের ফল

$$m\dot{X}/S^2 = (p_m/\omega) \sin \omega t \qquad (৮\text{-}৬.৪)$$

(২) দার্ঢ্যের তুলনায় ভর নগণ্য $s \ll m$; তখন

$sX/S^2 = p_m \cos \omega t$; অবকলনের ফল

$$s\dot{X}/S^2 = -\omega p_m \sin \omega t \qquad (৮\text{-}৬.৫)$$

(৩) দুয়ের মান তুলনীয় হলে

$$\dot{X} = \frac{-p_m \sin \omega t}{\frac{s}{\omega S^2} - \frac{m\omega}{S^2}} = \frac{p_m \sin \omega t}{\frac{m}{S^2}\omega - \frac{s}{S^2}\cdot\frac{1}{\omega}} \qquad (৮\text{-}৬.৬)$$

আমরা জানি, শাব্দ ভর $m_a = m/S^2$ এবং যান্ত্রিক নমনীয়তা

$$c_m = \frac{\text{শাব্দ নমনীয়তা}}{S^2} = C_a/S^2 \text{ এবং দার্ঢ্য গুণাংক } s = 1/c_m ;$$

$$\text{সুতরাং } s/S^2 = 1/C_a$$

অতএব প্রথম ক্ষেত্রে $m_a\ddot{X} = p_m \cos \omega t$;

$\therefore \quad m_a\dot{X} = (p_m/\omega) \sin \omega t$ (৮-৬.৪ক)

দ্বিতীয় ক্ষেত্রে $X/C_a = p_m \cos \omega t$

$\therefore \quad \dot{X}/C_a = -\omega p_m \sin \omega t$ (৮-৬.৫ক)

তৃতীয় ক্ষেত্রে $\dot{X} = \dfrac{p_m \sin \omega t}{\omega M_a - 1/\omega C_a}$ (৮-৬.৬ক)

তাহলে শাব্দ বাধ $Z_a = \dfrac{p_m \sin \omega t}{\dot{X}}$

প্রথম ক্ষেত্রে $Z_a = \omega m/S^2 = M_a \omega$ [৮-৬.৪ ও ৮-৬.৪ক]

দ্বিতীয় ক্ষেত্রে $Z_a = s/S^2\omega = 1/\omega C_a$ [৮-৬.৫ ও ৮-৬.৫ক]

৩-৬.২ সমীকরণে কণাবেগের মান আছে। তা থেকে যান্ত্রিক রোধ r_m বাদ দিলে ৮-৬.৬-এ আয়তন-বেগের সঙ্গে অভিন্ন সাদৃশ্য দেখা যাবে। এখন $\dot{X}$ চরমমান হতে হলে $\omega M_a = 1/\omega C_a$ বা $\omega^2 = 1/M_a C_a$ হবে এবং অনুনাদ ঘটবে। হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎস অনুনাদকের কম্পাংক-বিশ্লেষণে এই মান (৮-৫.২) আমরা পেয়েছি।

পরীক্ষায় মান নির্ণয়ঃ এখানে সুস্টার ও রবিনসন উদ্ভাবিত **হুইটস্টোন বর্তনী-নীতিতে** শাব্দবাধের মান নির্ণয়ের আলোচনা করা হবে। জানা শাব্দ বাধের একটা চওড়া নলকে মাত্রক হিসাবে নেওয়া হয়। পরীক্ষাধীন নল তার পাশেই থাকে। একটি টেলিফোন-পর্দা নল-দুটির এক পাশের মুখ বন্ধ রাখে। প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎধারায় তাকে স্পন্দিত করলে একই সঙ্গে দুই নলের বায়ুস্তম্ভ কম্পিত হয়। পরীক্ষাধীন নলের অপর প্রান্তে শাব্দ চাপ, মাত্রক নলের কোন এক বিন্দুতে শাব্দ চাপের সমান হবে। ডাক্তারী স্টেথোস্কোপের দুই নল দুই বায়ুস্তম্ভের মধ্যে ঢুকে শব্দসন্ধানীর কাজ করে। পরীক্ষাধীন নলের মুখে একটি শ্রবণ-নল স্থির থাকে। অপর নলটি মাত্রকের মধ্যে সম-শাব্দচাপ-বিন্দু সন্ধান ক'রে বেড়ায়। সেই বিন্দুতে পৌঁছলে কানে শব্দ আসে না, অর্থাৎ শ্রবণ-নল একটি হুইটস্টোন বর্তনীতে গ্যালভ্যানোমিটারের কাজ করে।

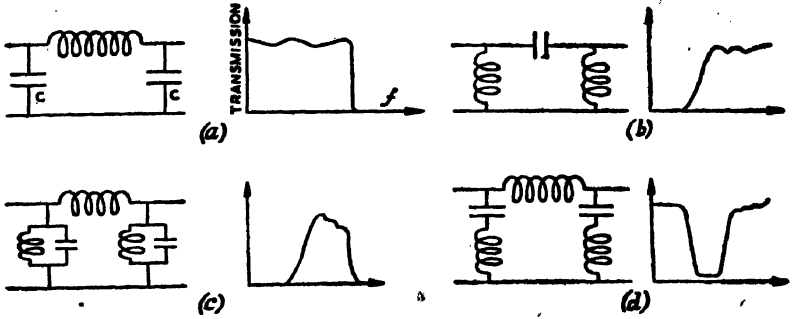
শাব্দ রোধ বা প্রতিক্রিয়তা বার করতে প্রত্যাবর্তী তড়িৎপ্রবাহের মতো শাব্দ ব্রিজ ব্যবহার করা হয়। তার দুই বাহু, l দৈর্ঘ্যের এবং S প্রস্থচ্ছেদের মোটা দুটি সদৃশ নল। লাউডস্পীকার থেকে λ দৈর্ঘ্যের শব্দতরঙ্গ তাদের মধ্যে সমান

ভাগে পাঠানো হয়। সেক্ষেত্রে নলের বাধ $(-j\rho_0 c/S)\cot 2\pi c/\lambda$ হয়; এই দুই অনুপাত-বাহুর (ratio arms) একটির সঙ্গে নিয়ন্ত্রণাধীন-দৈর্ঘ্য এবং জানা বাধের একটি নল আর অপরটির প্রান্তে নির্ণেয় বাধের নলটি জুড়ে দেওয়া হয়; তখন ব্রিজ সম্পূর্ণ হয়। এখন প্রথম দুই বাহু থেকে সমদূরত্বে শাব্দ চাপ সমান করা হয় নিয়ন্ত্রণাধীন নলের দৈর্ঘ্য তথা বাধ বদ্‌লে বদ্‌লে। একটি প্রভেদক (differential) মাইক্রোফোন চাপ-সমতা নির্দেশ করে। এটি বৈদ্যুতিক বর্তনীতে হেড-ফোনের মতো কাজ করে।

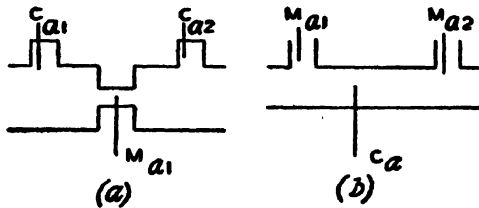
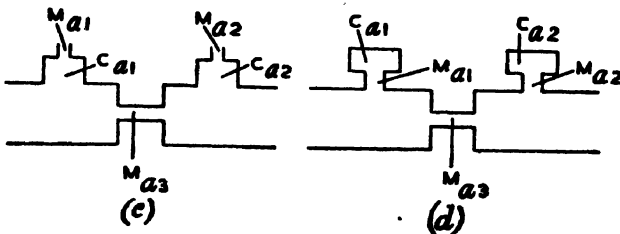
৮-৭. শাব্দ ফিল্‌টার:

কোন মিশ্র শব্দতরঙ্গ থেকে দরকারমতো কোন অবাঞ্ছিত কম্পাংক অপসারিত করা, ক্ষীণ ক'রে দেওয়া বা ছেঁকে বার ক'রে নেওয়ার ব্যবস্থাকে, শাব্দ ফিল্‌টার বলে। সাধারণত শাখা নল, শাখা গহ্বর এবং মোটা বা সরু ছেদের নলের সাহায্যে এই ব্যবস্থাগুলি করা যায়। হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎস অনুনাদকে আপতিত শব্দতরঙ্গের মাত্র অনুনাদী সুরটুকুই পেছনের ফুটো দিয়ে বেরিয়ে যেতে পারে; সে হিসাবে যন্ত্রটি এক শাব্দ ফিল্‌টার।

এদের কার্যনীতি শাব্দ-বৈদ্যুত উপমিতির উল্লেখযোগ্য নিদর্শন। ক্যাম্পবেল প্রথম দেখান যে মিশ্র প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা থেকে দরকারমতো (১) কেবলমাত্র নিম্ন কম্পাংকের, (২) কেবলমাত্র উচ্চ কম্পাংকের (৩) সংকীর্ণ পটি (band) বা পাল্লার প্রবাহ ছেঁকে বার ক'রে নেওয়া যায়। এদের বৈদ্যুতিক-ফিল্‌টার নাম দেওয়া হয়। প্রত্যাবর্তী প্রবাহে ধারকের প্রতিক্রিয়তা $X_c = 1/2\pi nC$; অর্থাৎ কম্পাংক কমলে প্রতিক্রিয়তা বাড়ে। সুতরাং স্বল্পকম্পাংক প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারাতে, ধারক বেশী বাধা আরোপ ক'রে তাকে দুর্বল, এমন কি আটকেও দিতে পারে। আবার আবেশকের প্রতিক্রিয়তা $(X_L = 2\pi nL)$ কম্পাংকের সঙ্গে বাড়ে; অর্থাৎ আবেশকে উচ্চ কম্পাংকের ধারা বেশী বাধা পাবে। সুতরাং কোন বর্তনীতে এই দুইয়ের যথাযোগ্য সমাবেশ ঘটিয়ে প্রত্যাবর্তী প্রবাহের অন্তর্গত যেকোন কম্পাংক বা কম্পাংকপাল্লা অপসারণ করা খুবই সহজ কাজ। 8.10 চিত্রের প্রথমটিতে নিম্নকম্পাংক ফিল্‌টার দেখানো হয়েছে—এখানে নির্দিষ্ট সীমার ঊর্ধ্বে প্রবাহ যেতে পারে না। পরেরটি উচ্চকম্পাংক ফিল্‌টার—নির্দিষ্ট কম্পাংকের নিচে প্রবাহ আটকে যায়; (c) এবং (d) চিত্রে কোন পাল্লার কম্পাংক পাঠানোর বা আটকানোর ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে। আবেশ (L) এবং ধারক (C) ও তাদের সংশ্লিষ্ট রোধের মানের ওপর কাঙ্ক্ষিত বা অনাকাঙ্ক্ষিত কম্পাংকের মান নির্ভর করে।

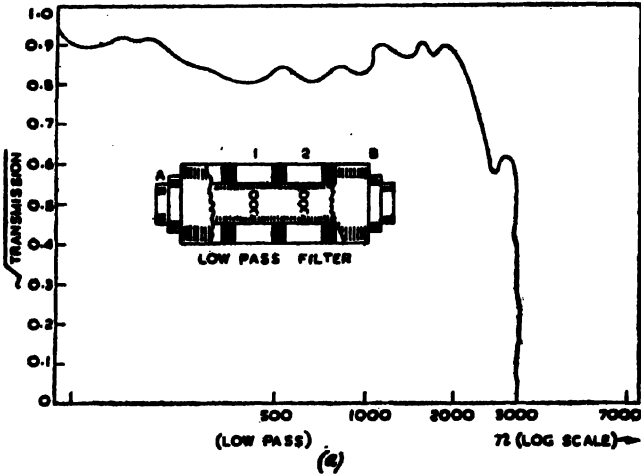
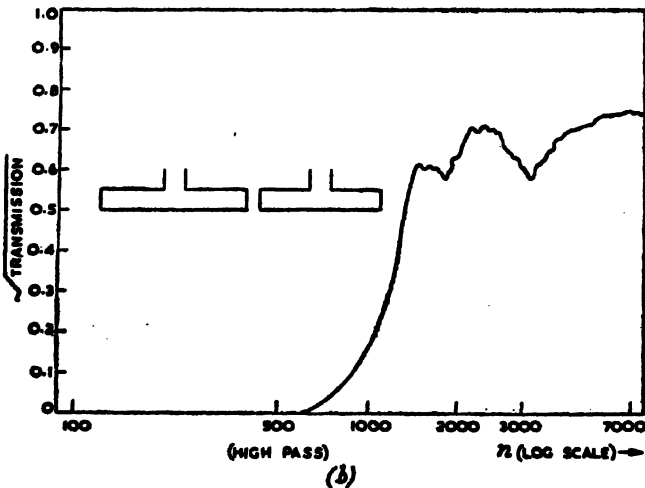
8.11 চিত্রে অনুযায়ী শাব্দ ফিল্‌টারগুলি দেখানো হয়েছে। তাদের শাখা-নল বা গহ্বরগুলির ক্রিয়া নির্দেশিত উপমিতির সাহায্যে বোঝা যেতে

চিত্র 8.10—বৈদ্যুতিক ফিল্‌টার বর্তনী

পারে। ধরা যাক, শাব্দ মাধ্যমের ঘনত্ব ρ, শব্দের তরঙ্গ বেগ c ; সরু নলের কার্যকর দৈর্ঘ্য l, প্রস্থচ্ছেদ S ; এবং V (a), (c) ও (d)-তে শাখা-গহ্বরগুলির এবং (b)-তে চওড়া নলের আয়তন। তাহলে

শাব্দ ভর $M_a = \rho l/S$, আবেশ L-এর সঙ্গে তুলনীয়, এবং

চিত্র 8.11—নিম্ন-কম্পাংক ফিল্‌টারের শাব্দ বর্তনী

চিত্র 8.11—উর্ধ্ব-কম্পাংক ফিল্‌টারের শাব্দ বর্তনী

শাব্দ নম্যতা $C_a = V/\rho_0 c^2$ ধারকত্ব C-এর সঙ্গে তুলনীয়।

মোটামুটিভাবে বলা যায় যে প্রধান সংবাহী নল এবং শাখা-নলের সংযোগ-বিন্দুতে মাধ্যমের যে সরণ হয় তার কিছুটা শাখা-নলে সঞ্চারিত হয়; ফলে শব্দ ক্ষীণ হয়, অপসারিতও হতে পারে। 8.12(a) চিত্রে প্রদর্শিত নিম্ন-

চিত্র 8.12(a)—নিম্ন-কম্পাংক ফিল্‌টার ও তার কৃতি-রেখা

চিত্র 8.12(b)—উচ্চ-কম্পাংক ফিল্‌টার ও তার কৃতি-রেখা

কম্পাংক ফিল্টারটি দুটি সমাক্ষ বেলন দিয়ে তৈরী ; তাদের মধ্যবর্তী ফাঁপা জায়গাটি 1, 2, 3 এই তিনটি সম-অন্তর প্রাচীর দিয়ে সমায়তন কক্ষে বিভক্ত। প্রতিটি কক্ষে কতকগুলি ছিদ্রের সাহায্যে ভেতরের শব্দসংবাহী নলের ভেতরের বায়ুর যোগাযোগ রাখা হয়। কম্পাংকের লগারিদ্‌মের সাপেক্ষে প্রেরণ-গুণাংকের বর্গমূলের পরিবর্তন-রেখা ফিল্‌টারের কৃতি (performance) নির্দেশ করে। ঋজু নলের গায়ে ছোট শাখা-নল লাগিয়ে উচ্চকম্পাংক ফিল্‌টার [8-12(b) চিত্র] তৈরী হয়। তারও কৃতি-রেখা দেখানো হয়েছে। কম্পাংক-পটি-প্রেরক (Band pass) ফিল্‌টার এই দুয়ের নানা সমন্বয়ে তৈরী করা যায়।

প্রশ্নমালা

১। বৈদ্যুতিক ও যান্ত্রিক স্পন্দনে বিভিন্ন রাশিগুলির মধ্যে সাদৃশ্যগুলি আলোচনা কর। প্রত্যক্ষ ও পরোক্ষ উপমিতির পার্থক্য নির্দেশ কর। যান্ত্রিক বর্তনী বললে কি বোঝাবে ?

দুটি যান্ত্রিক স্পন্দকের বৈদ্যুতিক প্রতিসমগুলি শ্রেণী-সমবায়ে আছে, না সমান্তরালে আছে, কি-ভাবে স্থির করবে, উদাহরণ দিয়ে বোঝাও।

২। বৈদ্যুতিক স্বাবেশ, রোধ ও ধারকত্বের শাব্দ-প্রতিসম কারা ? তাদের সংজ্ঞা দাও। তাদের সাহায্যে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ অনুনাদকের অনুনাদী কম্পাংকের গণিতীয় ব্যঞ্জক প্রতিষ্ঠা কর।

৩। যান্ত্রিক, বিকিরণ, শাব্দ, আপেক্ষিক শাব্দ এবং বিশিষ্ট, এই এই বাধ কাদের বলে ? তাদের মধ্যে সম্পর্কগুলি বার কর।

৪। যান্ত্র, শাব্দ এবং বৈদ্যুতিক সম্পর্কিত রাশিগুলি একটি সারণীর আকারে প্রকাশ কর।

বৈদ্যুতিক শ্রেণী ও সমান্তরাল সজ্জায় অনুনাদী বর্তনীগুলির প্রতিসম শাব্দ-বর্তনী আঁক।

৯

শব্দতরঙ্গের পথে বাধা

৯-১. অসন্ততি তল ও প্রতিবন্ধকে শব্দতরঙ্গ :

দুই সমসারক এবং সমসত্ত্ব মাধ্যমের বিভেদতলকে অসন্ততি (discontinuity) তল বলা যায় ; সেইরকম তলে শব্দতরঙ্গমালা এসে পড়লে তার শক্তির

(১) কিছু অংশ প্রথম মাধ্যমে সমদ্রুতিতে কিন্তু ভিন্ন মুখে ফিরে আসে ; এই ঘটনাকে **প্রতিফলন** বলে।

(২) সামান্য কিছু অংশের, বিভেদতলে **শোষণ** ঘটে ; তার ফলে সামান্য পরিমাণ তাপের উদ্ভব হয়।

(৩) বাকি অংশ, ভিন্ন দ্রুতিতে প্রায়ই ভিন্ন মুখে, দ্বিতীয় মাধ্যমে ঢুকে পড়ে ; তাকে বলে **প্রতিসরণ**।

একই মাধ্যমে দুই অংশে ঘনত্ব যদি ভিন্ন হয় তাহলে সেই অসন্ততি তলেও এই সব ঘটনা ঘটে ; আমরা ৯-১০ এবং ৯-১১ অনুচ্ছেদে দেখব যে বায়ুমণ্ডলে এবং সমুদ্রতলে উষ্ণতাভেদ এবং স্রোতের কারণে বিষমসত্ত্বতার উৎপত্তি হয়ে বিচিত্র ধরনের প্রতিফলন ও প্রতিসরণ ঘটে। বিভেদতলে শোষণের মান নগণ্য ধরা হবে। প্রতিফলিত ও প্রতিসৃত শব্দশক্তির পরিমাণ সীমাতলের দু'দিকে মাধ্যমের আপেক্ষিক শাব্দ বাধের ($Z_s = \rho c$) মানের উপর নির্ভর করে।

শব্দতরঙ্গ দুই মাধ্যমের বিভেদতলে **লম্ব বরাবর আপতিত** ($i=0$) হলে, শাব্দপ্রতিফলন-গুণাংক (α_r) এবং শাব্দপ্রতিসরণ গুণাংকের (α_t) পরিমাণ হয় যথাক্রমে

$$\alpha_r = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\right)^2 = \left(\frac{z_s' - z_s}{z_s' + z_s}\right)^2$$

এবং $$\alpha_t = 1 - \alpha_r = \frac{4 z_s z_s'}{(z_s + z_s')^2} \quad \text{(৯-৫.৯ ও ৯-৫.১০ সমীকরণ)}$$

আর আপতন তির্যক ($i=\theta$) হলে, তারা দাঁড়ায় যথাক্রমে

$$\alpha_r' = \left(\frac{z_s' \cos\theta - z_s \cos\theta'}{z_s' \cos\theta + z_s \cos\theta'}\right)^2 \quad \text{এবং} \quad \alpha_t' = \frac{4\, z_s' z_s \cos\theta . \cos\theta'}{(z_s' \cos\theta + z_s \cos\theta')^2}$$

(৯-৫.৭ এবং ৯-৫.৮ সমীকরণ দেখ)

পক্ষান্তরে, শব্দতরঙ্গমালা সীমিত আকারের প্রতিবন্ধকে পড়লে তাদের আচরণ, তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং প্রতিবন্ধকের তুলনামূলক মাপের পরিপ্রেক্ষিতে নিয়ন্ত্রিত হয়। এক্ষেত্রে তিনরকম ব্যাপার হতে পারে—

(ক) **প্রতিবন্ধক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক বড় হলে** তরঙ্গের **নিয়মিত প্রতিফলন** হবে, বাধার পেছনে ছায়াঞ্চলের সৃষ্টি হবে, ছায়ার কিনারা পেরিয়ে তরঙ্গের **অল্প কিছু অংশ** ছায়াঞ্চলে ঢুকে পড়বে; প্রতিবন্ধক যত ছোট, ছায়াঞ্চলে অনুপ্রবেশও তত বেশী।

(খ) **প্রতিবন্ধক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনীয় মাপের হলে** অনুপ্রবেশ যথেষ্টই হয়, নির্দিষ্ট ছায়াঞ্চল আর থাকে না। এই ঘটনা-বিশিষ্ট তরঙ্গধর্ম— তাকে **বিবর্তন** বলে।

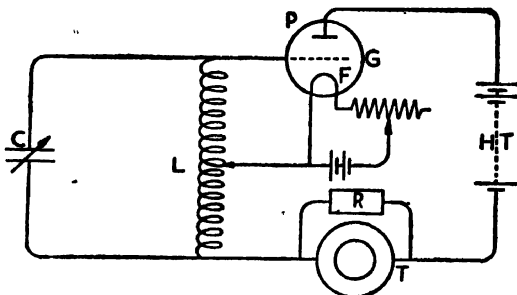
(গ) **প্রতিবন্ধক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক ছোট হলে** বাধা তখন **গৌণ** তরঙ্গ-উৎসের কাজ করে, তা থেকেই তরঙ্গেরা নতুন ক'রে গোলাকারে চারিদিকে ছড়িয়ে পড়ে। এই ঘটনাকে **বিক্ষেপণ** (scattering) বলে। বাতাসে ধূলিকণা ও কুয়াশা, জলে বুদ্‌বুদ বিক্ষেপণ ঘটায়।

৯-২. শব্দের তরঙ্গধর্ম-প্রতিষ্ঠায় স্বনক এবং সন্ধানী :

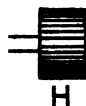
৬-১ অনুচ্ছেদে আমরা শব্দের ভিন্ন ভিন্ন তরঙ্গধর্মের কথা বলেছি; তবে পরীক্ষাগারে তাদের সার্থক নিরীক্ষণের পথে অন্তরায়, সাধারণ শব্দের দীর্ঘ তরঙ্গদৈর্ঘ্য। তাই হ্রস্বদৈর্ঘ্য শব্দের উৎপাদন ও সন্ধান পরীক্ষাগারে বিশেষ দরকার, কেননা তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছোট হলে সীমিত মাপের যন্ত্রপাতিতেই কাজ চলে। তাই উচ্চ কম্পাংকের স্বনক হিসাবে আমরা আধুনিক ভাল্‌ভ্‌-টেলিফোন এবং প্রাচীন গ্যাল্‌টন হুইশ্‌ল এবং শব্দসন্ধানী হিসাবে শান্দ রেডিওমিটার এবং সুবেদী দীপশিখা আলোচনা ক'রবো।

খুব উচ্চ কম্পাংকের স্পন্দনজাত **স্বনোত্তর** তরঙ্গ আমরা শুনতে পাই না বটে, কিন্তু তারা অবিকল শব্দতরঙ্গই—খুবই ছোট দৈর্ঘ্যের অনুদৈর্ঘ্য স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ। তাদের সহায়তায় শব্দশক্তির তরঙ্গধর্ম, প্রয়োজনে রশ্মিধর্মও সহজেই প্রতিষ্ঠা করা যায়। ২০ অধ্যায়ে এদের সম্বন্ধে বিশদ আলোচনা করা যাবে।

(১) **Humby-উদ্ভাবিত ভাল্‌ভ্‌-টেলিফোন :** এটি একটি ভাল্‌ভ্‌-নিয়ন্ত্রিত টেলিফোন-গ্রাহক (T) বা লাউডস্পীকার। এতে প্রয়োজনমত যে-কোন উচ্চ কম্পাংকের স্পন্দন-সৃষ্টি সম্ভব এবং সেই স্পন্দনাংক খুব সূক্ষ্ম পাল্লার মধ্যে নিয়ন্ত্রণ করা যায়। একটি ট্রায়োডের গ্রিড-বর্তনীতে (চিত্র 9.1) এক

স্বাবেশক-ধারক (L-C) বর্তনী থাকে। C-র ধারকত্ব নিয়ন্ত্রণ ক'রে ইচ্ছামতো কম্পাংকের বৈদ্যুতিক স্পন্দন সৃষ্টি করলে প্লেট-প্রবাহ সেইভাবে পরিবর্তিত হয়। টেলিফোন (T) গ্রাহক বা লাউডস্পীকারটি প্লেট-বর্তনীতে যুক্ত থাকে;

চিত্র 9.1—ভাল্‌ভ্‌-টেলিফোন

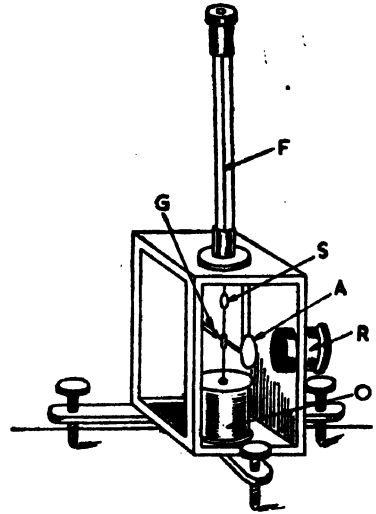
তার সমান্তরালে R একটি রোধক, তার কাজ T-র মধ্যে প্রবাহ নিয়ন্ত্রণ ক'রে শব্দপ্রাবল্য নিয়ন্ত্রণ করা। যন্ত্রটির কম্পাংক 4 থেকে 16 kHz পর্যন্ত করা যায়।

(২) **গ্যাল্‌টন হুইশ্‌ল** (চিত্র 9.2): এটি মূলতঃ 6 সেমি লম্বা, 1.5 সেমি ব্যাসের একটি সরু নল। এর এক প্রান্তের কাছাকাছি O একটি ছোট রন্ধ্র; P প্লাগ তাকে আংশিক অবরোধ ক'রে রাখে। প্লাগের ওপর-তল ঢালু মসৃণ এবং নলের গায়ে ঝাল দিয়ে (solder) আটকানো। নলের অপর

চিত্র 9.2—গ্যাল্‌টন হুইশ্‌ল

মুখ Q-ও বন্ধ। তার মধ্যে দিয়ে স্ক্রু-কাটা রড S ঢুকেছে। S-এর প্রান্তে নলের মধ্যে R ছোট একটি পিস্টন; মাইক্রোমিটার স্ক্রু-শীর্ষ H পিস্টনের অবস্থান নিয়ন্ত্রণ ও নির্দেশ করে।

হুইশ্‌লের খোলা মুখে ফুঁ দিলে, তীক্ষ্ণ অর্থাৎ হ্রস্বদৈর্ঘ্য শব্দতরঙ্গ শোনা যায়। R যত ভেতরে ঢোকে তীক্ষ্ণতা ততই বাড়ে—কম্পাংক, নলের মোট দৈর্ঘ্য এবং RO দূরত্বের ওপর নির্ভর ক'রে। এই হুইশ্‌ল দিয়ে 30 kHz

কম্পাংকের স্বনোত্তর তরঙ্গ সৃষ্টি করা যায়। আজকাল অপ্রচলিত হলেও এটি খুব সরল এবং তীক্ষ্ণ কম্পাংকের স্বনক।

(৩) Pohl-উদ্ভাবিত রেডিওমিটার (চিত্র 9.3) : এর প্রধান অংশ একটি সুবেদী ব্যাবর্ত দোলক। দোলক বাহুর এক প্রান্তে ধাতুর তৈরী খাড়া চাকৃতি (A) আর G, বাহুর অপর প্রান্তে প্রতি-ভার (counter-poise)। দোলক-বাহুটি ব্রোঞ্জের দীর্ঘ আলম্বন-সূত্র F দিয়ে ঝোলানো; তাতে S সংশ্লিষ্ট বাতি-স্কেল (lamp and scale) ব্যবস্থার আয়না। তলায় O এমন এক ভার যাতে দোলন অবদমিত হয়। R রেডিও-মিটার কক্ষের একটি পার্শ্বনল। তার মধ্যে দিয়ে অবতল দর্পণে সংহত করা শব্দ A-র ওপরে ফেলা হয়।

চিত্র 9.3—শাব্দ রেডিওমিটার

(৪) সুবেদী শিখা : 0.5 মিমি মতো সরু সূচীরন্ধ্র দিয়ে নির্গত জেট-নলের গ্যাস-শিখা উচ্চকম্পাংক শব্দের অত্যন্ত সুবেদী সন্ধানী। জেটের সঙ্গে গ্যাস ব্যাগ লাগিয়ে গ্যাসের চাপ বাড়িয়ে বাড়িয়ে বাড়িয়ে সরু প্রায় 8″ মতো লম্বা শিখা জ্বালানো হয়। এপর্যন্ত শিখা নিষ্কম্প থাকে, কিন্তু আর সামান্য বাড়ালেই অস্থির (unstable) হয়ে পড়ে, ছোট হয়ে যায়, দন্তুর (serrated) হয়ে জোর গর্জন করতে থাকে। শিখার এই দুয়ের ক্রান্তিক অবস্থায় শব্দের আপতন হলে গ্যাসে আবর্ত সৃষ্টি হয় এবং তাতেই শিখাটি নিষ্কম্প থেকে দন্তুর অবস্থায় আসে। তখন চাবির গোছার ঝনৃঝনানি বা ঘড়ির টিক্‌টিক্ শব্দে বা কোন উচ্চ কম্পাংকের ক্ষণ-শব্দে (pulse) শিখা খুব সহজেই বিক্ষুব্ধ হয়। সুবেদী শিখা স্থাণুতরঙ্গে চাপ সুস্পন্দবিন্দুতে সাড়া দেয় কিন্তু সরণ সুস্পন্দবিন্দুতে নয়; রুবেন্‌সের পরীক্ষা (5.14 চিত্র) দেখ।

৯-৩. শব্দের স্পন্দন :

প্রাকৃতিক, ব্যবহারিক ও দৈনন্দিন জীবনে এর অসংখ্য উদাহরণ ছড়িয়ে রয়েছে। প্রতিধ্বনি, দীর্ঘায়িত মেঘগর্জন, বড় হল্‌-ঘরে বা শ্রবণ-কক্ষে

অনুরণন প্রভৃতি শব্দ-প্রতিফলনের পরিচিত ঘটনা। লম্বরেখা বরাবর প্রতিফলিত শব্দের সঙ্গে আপতিত তরঙ্গের উপরিপাতনে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি হয়। শব্দে এইজাতীয় তরঙ্গের গুরুত্ব খুব বেশী।

নিয়মিত প্রতিফলনের সর্ত: এজন্যে বাধাতল তরঙ্গের দৈর্ঘ্যের সাপেক্ষে বড় হতে হবে। নিম্নতম শ্রবণগ্রাহ্য কম্পাংকের তরঙ্গদৈর্ঘ্য প্রায় 32 ফিট এবং তীক্ষ্নতম কম্পাংকের ক্ষেত্রে তা $\frac{1}{2}$ ইঞ্চির মতো। তাই সাধারণভাবে শব্দের প্রতিফলনের জন্য বড় দেওয়াল, পাহাড়, তরুশ্রেণী, মেঘপুঞ্জ প্রভৃতি বিস্তৃত তলের দরকার। তা ছাড়া, প্রতিফলক তল আপেক্ষিক ভাবে মসৃণ হওয়া চাই, অর্থাৎ তলের অমসৃণতা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সাপেক্ষে খুব ছোট হতে হবে। বড় দেওয়াল থেকে শব্দের প্রতিফলন নিয়মিত, কিন্তু আলোর বেলায় বিক্ষিপ্ত; কারণ দেওয়ালের অমসৃণতা আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ($0{\cdot}4\mu$ থেকে $0{\cdot}7\mu$; $\mu = 10^{-4}$ সেমি) সাপেক্ষে অনেক বড়, কিন্তু শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় নেহাৎই নগণ্য। আপেক্ষিক আকারের জন্যই ছোট আয়নায় আলোর প্রতিফলন হয়, শব্দের নয়।

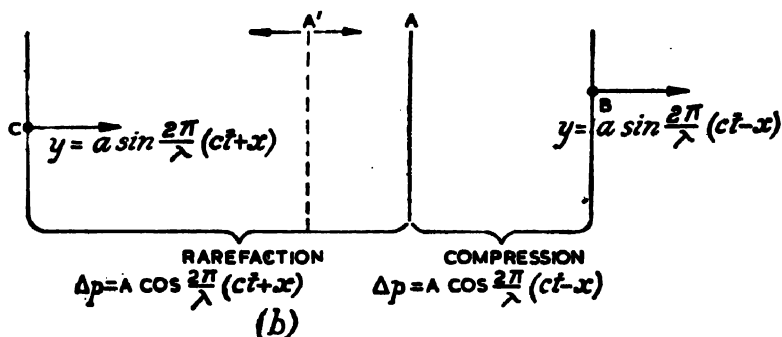
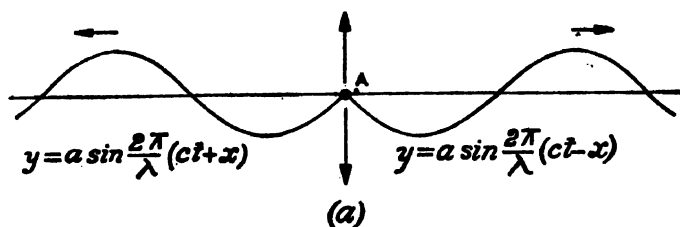
শব্দের প্রতিফলন ও প্রতিসরণ স্নেলের সূত্র মেনে চলে। শব্দতরঙ্গ ছোট হলে তা পরীক্ষাগারে সহজেই দেখানো যায়। প্রয়োজনীয় যন্ত্রপাতি আগের অনুচ্ছেদে বলা হ'ল। শব্দের কতটা প্রতিসৃত হবে তা নির্ভর করে দুই মাধ্যমের আপেক্ষিক বাধের তুলনামূলক মানের ওপর। সে আলোচনা ৯-৫ অনুচ্ছেদে করা হবে।

৯-৪. শব্দ-প্রতিফলনের গণিতীয় বিশ্লেষণ:

মাধ্যমের কোন বিন্দুতে আলোড়ন হলে যেকোন সরলরেখা বরাবর দুই বিপরীতমুখী তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। আমরা ধরে নেব যে, আলোড়ন সরল দোলজাতীয় এবং তরঙ্গের ব্যাপ্তি x-অক্ষ বরাবর। 9.4 চিত্রে সেইজাতীয় যমজ অনুপ্রস্থ ও অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের উৎপত্তি ও ব্যাপ্তির রীতি দেখানো হয়েছে। অনুপ্রস্থ তরঙ্গে যমজ-তরঙ্গ অভিন্ন দশায় থাকে এবং ডাইনে-বাঁয়ে (x, t) কণার সরণ যথাক্রমে হয়

$$y_1 = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct - x) \text{ এবং } y_2 = a \sin \frac{2\pi}{\lambda}(ct + x)$$

অনুদৈর্ঘ্য যমজ-তরঙ্গ উৎপাদন-বিন্দুতে বিপরীতদশা হয়; কারণ বোঝাতে, ধরা যাক, সংকোচন-তরঙ্গের উৎপত্তি এক পাতের (A') স্পন্দনের জন্য হচ্ছে

এবং স্পন্দনের শেষে তার শীর্ষ A অবস্থানে রয়েছে ; তাহলে ডানদিকে সংকোচন এবং একই সঙ্গে বাঁয়ে তনূভবনের সৃষ্টি হবে। ঘনীভবনে কণার সরণ তরঙ্গের অভিমুখে হচ্ছে কিন্তু তনূভবনে তারা উল্টোমুখে ; তাই B

চিত্র 9.4—(*a*) অনুপ্রস্থ ও (*b*) অনুদৈর্ঘ্য যমজ তরঙ্গের উৎপত্তি

এবং C অবস্থানে কণার সরণ সমমুখে (ডানদিকে) কিন্তু তরঙ্গের প্রসার বিপরীত মুখে। কাজেই **যমজ সরণ-তরঙ্গ উৎপত্তিবিন্দুতে বিপরীতমুখী এবং সমদশা, আর সেই বিন্দুতে যমজ সংকোচন-তরঙ্গ বিপরীতমুখী, বিপরীত-দশা।** দ্বিতীয়দের সরল দোলজাতীয় সমীকরণ যথাক্রমে

$$p=p_0 \cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x) \text{ এবং } p=-p_0\cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct+x)$$

এখন আলোচ্য, সমতলীয় তরঙ্গের দৃঢ় এবং মুক্ত সীমানায় লম্ব-আপতন। $+x$ দিকে তরঙ্গ সমীকরণে কণাসরণ $\xi_1=f_1\ (ct-x)$ এবং $-x$ দিকে কণাসরণ $\xi_2=f_2\ (ct+x)$ ধরা হবে।

ক. দৃঢ় সীমানা : ধরা যাক, এই সীমানার অবস্থান $x=0$ বিন্দুতে এবং মাধ্যমের কোন এক বিন্দুতে কণার দুই তরঙ্গাঘাতে যৌথ সরণ

$$\xi=f_1\ (ct-x)+f_2\ (ct+x)$$

যেহেতু দৃঢ় সীমানায় কখনই সরণ হতে পারে না, তাই $x=0$ বিন্দুতে t-র সব মানেই $\xi=0$;

$$\therefore \quad f_2(ct) = -f_1(ct)$$

তাহলে $f_2(ct+x) = -f_1(ct+x)$

$$\begin{aligned} \therefore \quad \xi &= f_1(ct-x) - f_1(ct+x) \\ &= f(ct-x) - f(ct+x) \qquad (১-৪.১) \\ &= \xi_1 + \xi_2 \end{aligned}$$

(১) এখানে $\xi_2 = -f(ct+x)$ স্পষ্টতই প্রতিফলিত তরঙ্গ নির্দেশ করছে ; সেখানে কণাসরণ বিপরীত মুখে

(২) আবার আপতিত তরঙ্গে কণাবেগ $\dot{\xi}_1 = c.f'(ct-x)$, প্রতিফলিত তরঙ্গে $\dot{\xi}_2 = -c.f'(ct+x)$; প্রতিফলন সীমানায় $x=0$, অতএব সেখানে কণাবেগ যথাক্রমে $\dot{\xi}_1 = c.f'(ct)$ এবং $\dot{\xi}_2 = -c.f'(ct)$

অর্থাৎ প্রতিফলন-সীমানায় কণাবেগ সমান ও বিপরীতমুখী।

অতএব দৃঢ় সীমায় আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গে দশাবেগ এবং কণাবেগ দুয়েরই অভিমুখ উল্টে যায় ; সুতরাং তাদের মধ্যে সম্পর্ক অপরিবর্তিত থেকে যায়। একটি তারের এক প্রান্ত শক্ত ক'রে বেঁধে যদি ওঠা-নামা করানো যায়, তাহলে বাঁধা প্রান্তে এই ব্যাপার ঘটে। এই সিদ্ধান্ত সরণ-তরঙ্গ সম্পর্কে প্রযোজ্য, সংকোচন-তরঙ্গে নয়।

(৩) আপতিত তরঙ্গে সংকোচন $s_1 = -\dfrac{\partial \xi_1}{\partial x} = +f'(ct-x)$

প্রতিফলিত তরঙ্গে সংকোচন $s_2 = -\dfrac{\partial \xi_2}{\partial x} = +f'(ct+x)$

দৃঢ় সীমানায় $(x=0)$ সংকোচন যথাক্রমে $f'(ct)$ এবং $f'(ct)$;

অর্থাৎ, প্রতিফলনে সংকোচন অপরিবর্তিত থেকে যায়। সুতরাং আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গে চাপভেদ অক্ষুণ্ণ থাকে। এক প্রান্তে বদ্ধ অর্গান-নলে (১৪-২ক) এইরকম হয়।

খ. মুক্ত প্রান্ত : এইজাতীয় সীমানায় বায়ুর নড়াচড়ায় বাধা থাকবে না, কাজেই চাপবৈষম্য বা সংকোচনও থাকা সম্ভব নয়। আগের মতোই

$$\xi = f_1(ct-x) + f_2(ct+x)$$

এবং $$\frac{\partial \xi}{\partial x} = -f_1'(ct-x) + f_2'(ct+x)$$

সীমানায় ($x=0$) সংকোচন $\partial\xi/\partial x$ নেই, কাজেই $f_2{}'(ct)=f_1{}'(ct)$

বা $\quad f_2{}'(ct+x)=f_1{}'(ct+x)$

সমাকলন করলে, $f_2(ct+x)=f_1(ct+x)+k$ পাওয়া যাবে।

$$\therefore \quad \xi=f_1(ct-x)+f_1(ct+x)+k$$
$$=f(ct-x)+f(ct+x)+k \qquad (৯\text{-}৪.২)$$

$x=0$ এবং $t=0$ সর্তাধীনে অর্থাৎ সীমানায় ও আদিমুহূর্তে সমাকলন ধ্রুবক $k=\xi_0$ হবে ; তার মানে, গোড়া থেকেই সীমাতলের একটা স্থায়ী সরণ থাকার কথা। যেহেতু তরঙ্গের বেলায় কণার স্থায়ী সরণ কখনই হয় না, $k=0$ হবে।

৯-৪.২ আলোচনা ক'রে বলতে পারি

(i) প্রতিফলিত সরণতরঙ্গে $\xi_2=f(ct+x)$

(ii) $\partial\xi_1/\partial x=-f'(ct-x)$ এবং সীমাতলে ($x=0$)

$$\frac{\partial\xi_1}{\partial x}=-f'(ct) \text{ হবে।}$$

আবার $\quad \partial\xi_2/\partial x=+f'(ct+x)$ এবং $x=0$ বিন্দুতে

$$\frac{\partial\xi_2}{\partial x}=f'(ct) \text{ হবে।}$$

কাজেই মুক্ত সীমানায় সংকোচনের দশা উল্টে যায়, ঘনীভবন তনুভবন রূপে প্রতিফলিত হয়।

(iii) আবার আপতিত তরঙ্গে, কণাবেগ $\dot{\xi}_1=c.f'(ct-x)$;
প্রতিফলিত তরঙ্গে $\dot{\xi}_2=c.f'(ct+x)$

এবং $x=0$ বিন্দুতে $\dot{\xi}_1=cf'(ct)$, $\dot{\xi}_2=c.f'(ct)$

অতএব সীমাতলে কণাবেগ অপরিবর্তিতই থাকছে।

প্রতিফলনে তরঙ্গবেগ সদাই বিপরীতমুখী ; আর তার সাপেক্ষে দৃঢ় প্রান্তে সরণ, কণাবেগ, সংকোচন, চাপবৈষম্য সবাই সমদশা এবং নমনীয় প্রান্তে সব রাশিগুলিই বিপরীত দশা হয়।

৯-৫. উপ-অসীম (Semi-infinite) মাধ্যমে প্রতিফলন ও প্রতিসরণের ব্যাপকতর বিশ্লেষণ :

দুই সমসত্ত্ব, সমসারক মাধ্যমের অসন্ততি তলের দু'ধারে বিশিষ্ট বাধ $Z_0(=\rho c)$ আলাদা হলে আপতিত শব্দতরঙ্গের কিছুটা, প্রতিফলনের সূত্র

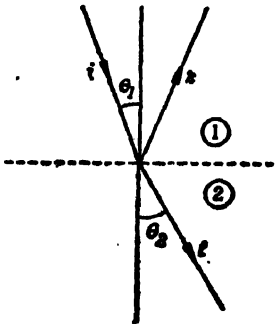
মেনে ফিরে আসে আর বাকীটা (শোষণ অগ্রাহ্য করলে) দ্বিতীয় মাধ্যমে ঢুকে পড়ে। সংকোচন তরঙ্গের y-মুখী আপতন বিবেচনা ক'রে আপাতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গে শাব্দ-চাপের সমীকরণ ধরা যাক যথাক্রমে

$$p_i = P_i\, e^{j(\omega t-\beta y)} \text{ এবং } p_r = P_r\, e^{j(\omega t-\beta y)} \qquad (৯\text{-}৫.১)$$

এখানে আপাতিত শাব্দ-চাপের চরম মান P_i বাস্তব রাশি ; p_r এবং P_r প্রতিফলিত সংকোচনের নিমেষ ও চরম শাব্দ-চাপ—তারা জটিল রাশিও হতে পারে এবং তাদের মধ্যে দশাভেদও থাকবে। বিনা শোষণে প্রতিসৃত তরঙ্গে শাব্দ-চাপের মান

$$p_t = P_t\, e^{j(\omega t-\beta' y)} \qquad (৯\text{-}৫.২)$$

ধরা যাক, আপাতিত শব্দতরঙ্গ সমতলীয় ; তার প্রতিফলন ও প্রতিসরণের জন্য কয়েকটি সর্ত পালিত হতে হবে—অসন্ততি তলের দু'ধারে (১) দুটি ভৌত রাশি, যথাক্রমে শাব্দ-চাপ এবং তলের সন্নিকটে কণাবেগের (v) লম্ব উপাংশ সমমান হতে হবে, তার সঙ্গে আবার (২) সংকোচন এবং কণাসরণের লম্ব উপাংশও তলের দু'ধারে সমান হতে হবে। অবশ্য পালনীয় এই সর্তগুলিই **প্রান্তিক সর্ত**। এই রাশিগুলিকে **সীমাভেদী সন্তত রাশি** (continuous across the boundary) বলে। প্রথম সর্ত পালিত হলে সীমাতলের দু'পাশে সন্ততি বজায় থাকে, দ্বিতীয় সর্ত পূরণ না হলে মাধ্যম-দুটি বিচ্ছিন্ন হয়ে পড়ে।

তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এবং সীমাতলের সাপেক্ষে প্রান্তিক সর্ত বদলায়।

চিত্র 9.5
শাব্দ-রশ্মির প্রতিসরণ

তির্যক আপতন : ধরা যাক, 1 ও 2 চিহ্নিত দুটি উপ-অসীম সমসত্ত্ব, সমসারক মাধ্যমের বিভেদতলে θ_1 কোণে সমতলীয় দোল-তরঙ্গ c_1 বেগে আপাতিত (চিত্র 9.5) হয়েছে। দ্বিতীয় মাধ্যমের শাব্দঘনত্ব বেশী ধরলে, তাতে বেগ $c_2 > c_1$ এবং প্রতিসরণ-কোণ $\theta_2 > \theta_1$ হবে। এখানেও স্নেলের সূত্র $\sin\theta_1/\sin\theta_2 = c_1/c_2$ পালিত হবে।

সীমাতলে ($y=0$) সব সময়েই (অর্থাৎ t-র মান যাই হোক না কেন) প্রান্তিক সর্ত পূর্ণ হতে হবে। সীমাতলের কাছাকাছি তিনরকম আলোড়ন উপস্থিত—আপাতিত, প্রতিফলিত আর প্রতিসৃত। প্রান্তিক সর্তানুযায়ী

(i) $p_t = p_i + p_r$ বা $P_t e^{j\omega t} = (P_i + P_r) e^{j\omega t}$ [P_i, P_r বিষমমুখী]

অর্থাৎ $$P_t = P_i + P_r \qquad (৯\text{-}৫.৩)$$

(ii) $$u_t \cos\theta_2 = (u_i + u_r)\cos\theta_1 \qquad (৯\text{-}৫.৪)$$

এখন দুই মাধ্যমে বিশিষ্ট বাধ যথাক্রমে $z_1 = \rho_1 c_1 = p_i/v_i$ এবং $z_2 = \rho_2 c_2 = p_t/v_t$; আর $p_r/v_r = \rho_1(-c_1) = -z_1$; তাহলে ৯-৫.৪ থেকে

$$\frac{p_t}{z_2}\cos\theta_2 = \frac{p_i - p_r}{z_1}\cos\theta_1$$

বা $$\frac{P_t \cos\theta_2}{z_2} = \frac{P_i - P_r}{z_1}\cos\theta_1 \qquad (৯\text{-}৫.৫)$$

$$\therefore \quad z_1 P_t \cos\theta_2 = z_2 (P_i - P_r)\cos\theta_1 \qquad (৯\text{-}৫.৬)$$

৯-৫.৩ থেকে P_t-র মান বসালে

$$(P_i + P_r) z_1 \cos\theta_2 = (P_i - P_r) z_2 \cos\theta_1$$

$$\therefore \quad \frac{P_r}{P_i} = \frac{z_2\cos\theta_1 - z_1\cos\theta_2}{z_2\cos\theta_1 + z_1\cos\theta_2}$$

শাব্দ-প্রতিফলন-গুণাংক বা প্রতিফলিত তীব্রতা

$$\alpha_r = (P_r/P_i)^2 = \left(\frac{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 - \rho_1 c_1 \cos\theta_2}{\rho_2 c_2 \cos\theta_1 + \rho_1 c_1 \cos\theta_2}\right)^2 \qquad (৯\text{-}৫.৭)$$

তাহলে প্রতিসরণ-গুণাংক $$\alpha_t = 1 - \alpha_r = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2 \cos\theta_1 . \cos\theta_2}{(\rho_1 c_1 \cos\theta_2 + \rho_2 c_2 \cos\theta_1)^2} \qquad (৯\text{-}৫.৮)$$

৯-৫.৭ বলছে যে α_r, আপতন-কোণের ওপর নির্ভর করে। লম্ব আপতন হলে, $\theta_1 = \theta_2 = 0$; তখন শাব্দ-প্রতিফলন-গুণাংক

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{p_r}{p_i}\right)^2 = \left(\frac{P_r}{P_i}\right)^2 = \left(\frac{z_s' - z_s}{z_s' + z_s}\right)^2$$

$$= \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\right)^2 \qquad (৯\text{-}৫.৯)$$

এবং ৯-৫.৮ থেকে শাব্দ-প্রতিসরণ-গুণাংক,

$$\alpha_t = 1 - \alpha_r = 1 - \left(\frac{z_s' - z_s}{z_s' + z_s}\right)^2 = \frac{4 z_s z_s'}{(z_s + z_s')^2}$$

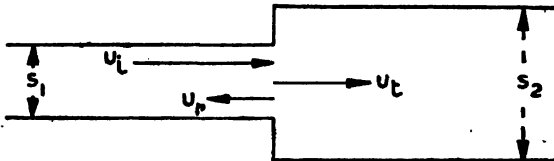
$$= \frac{4\rho_1\rho_2 c_1 c_2}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2} \qquad (৯\text{-}৫.১০)$$

দুই গুণাংকই শাব্দ-তীব্রতার যথাযথ পরিমাপ। কেননা ৬-৬.২ অনুসারে মাধ্যমের কোন বিন্দুতে শাব্দ-তীব্রতা শাব্দ-চাপের বর্গের অনুপাতে এবং মাধ্যমের বিশিষ্ট শাব্দ-বাধের (ρc) ব্যস্তানুপাতে বদলায়।

যদি $z_s' \gg z_s$ বা উল্টো হয়, তাহলে আপতিত শব্দের প্রায় সবটাই প্রতিফলিত হয়। যেমন বায়ুর ক্ষেত্রে $\rho c = 42$ একক, জলের ক্ষেত্রে 1.5×10^5 একক এবং ইস্পাতের বেলায় 4.84×10^6 একক। কাজেই বায়ু থেকে জল বা ইস্পাতে (বা সাধারণভাবে কোন ধাতুতে) শব্দের লম্ব আপতন হলে প্রায় সবটাই প্রতিফলিত হবে। আবার $z_s = z_s'$ হলে সবটাই প্রতিসৃত হবে। *rho-c* রবার এমন এক উপাদান, যার z_s মান প্রায় জলের সমান। আজকাল **ব্যাথিস্কোপ** নামে সমুদ্রগভীরে পর্যবেক্ষণ-কক্ষে এর ব্যবহারিক প্রয়োগ হচ্ছে। তাতে এই জিনিসের আবরণ দেওয়া থাকে; ফলে জল থেকে যেকোন শব্দ ব্যাথিস্কোপের ভেতর শাব্দগ্রাহকে স্বচ্ছন্দে যেতে পারে কিম্বা তার ভেতরের কোন স্বনক থেকে শব্দ বাইরে আসতে পারে। দুই মাধ্যমের আলোক-প্রতিসরাংক সমান হলে যেমন বিভেদতলে আলোর প্রতিফলন হয় না (যেমন কাচের লেন্সের ওপর NaF বা KF-এর $\lambda/4$ বেধের আস্তর থাকলে) সবটাই প্রতিসৃত হয়, এ ব্যাপারটাও তাই।

এই ব্যাপারের তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা করতে গেলে বলা যায় যে, স্বনক ও শব্দ-সন্ধানী দুই আলাদা মাধ্যমে রাখলে যদি তাদের z_s-এর মানে অনেক তফাৎ থাকে তাহলে গ্রাহকে সামান্য শক্তিই পৌঁছায়; তাদের মাঝে যদি এমন এক তৃতীয় মাধ্যম রাখা যায়, যার $z_s'' = \sqrt{z_s z_s'}$ এবং সেই স্তরের বেধ (d) আপতিত তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের চতুর্থাংশের অযুগ্ম গুণিতকের $[(2m+1)\lambda/4]$ সমান হয় তাহলে আপতিত শক্তির সবটাই প্রতিসৃত হবে।

লম্ব-বরাবর শব্দ প্রতিফলনের একটি ব্যবহারিক প্রয়োগ দুটি বিভিন্ন

চিত্র 9.6

ব্যাসের নলের সংযোগস্থলে (চিত্র 9.6) করা হয়। শাব্দ-ফিল্টারের বেলায় (§ ৮-৭) এরকম নল-সংযোগ থাকে। দুই-মুখ-খোলা অর্গান-নলের মুখেও

(১৪-২খ) তাই হয়। তাদের সংযোগ ছেদে আংশিক প্রতিফলন হবে; এই অসঙ্গতি, শাব্দ-বাধের (z_a) হঠাৎ পরিবর্তনের জন্যে হয়। এখানে প্রান্তিক সর্ত হচ্ছে যে, দুই নলে শাব্দ-চাপ এবং মাধ্যমের আয়তন-বেগ অপরিবর্তিত থাকবে। সুতরাং ৯-৫.৩ ও ৯-৫.৪ অনুসারে

$$P_i+P_r=P_t \text{ বা } p_i+p_r=p_t$$

এবং $U_i+U_r=U_t$ বা $S_1u_i+S_1u_r=S_2u_t$

(u এখানে বেগমান, S_1 ও S_2 দুই অংশে প্রস্থচ্ছেদ)

$$\therefore \quad S_1\left(\frac{p_i}{\rho c}-\frac{p_r}{\rho c}\right)=S_2\frac{p_t}{\rho c}$$

বা $S_1(P_i-P_r)=S_2P_t=S_2(P_i+P_r)$

$$\therefore \quad \frac{P_i-P_r}{P_i+P_r}=\frac{S_2}{S_1} \text{ বা } \frac{P_r}{P_i}=\frac{S_2-S_1}{S_2+S_1}$$

সুতরাং $\alpha_r=(P_r/P_i)^2=\left(\dfrac{S_2-S_1}{S_2+S_1}\right)^2$ (৯-৫.১১)

প্রশ্ন: দেখাও যে, সরু নল থেকে চওড়া নলে শব্দ ঢুকলে সংযোগ-ক্ষেত্রে ঘনীভবন তনুভবন রূপে প্রতিফলিত হবে।

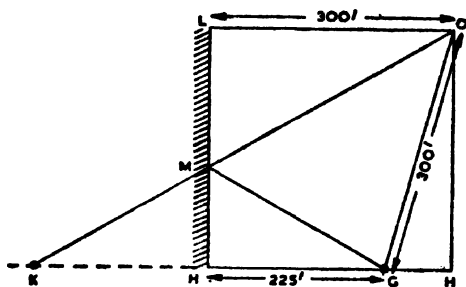
৯-৬. প্রতিধ্বনি:

পাহাড়, প্রকাণ্ড হল্-ঘর, লম্বা উঁচু প্রাচীর, বনের কিনারা প্রভৃতি থেকে প্রতিফলিত শব্দ বা প্রতিধ্বনি, আমাদের পরিচিত ঘটনা। প্রতিধ্বনি মাত্রেই মূল ধ্বনি থেকে অল্পবিস্তর আলাদা হয়: "ধ্বনিটিরে প্রতিধ্বনি সদা ব্যঙ্গ করে"। মূল ধ্বনিতে সুরের সংখ্যা, তাদের আপেক্ষিক প্রাবল্য, প্রতিফলকের বৈচিত্র্য প্রভৃতি এইজাতীয় পরিবর্তনের জন্য সাধারণত দায়ী।

মূল শব্দ থেকে প্রতিফলিত শব্দ আলাদা ক'রে শোনা গেলে তবে তাকে প্রতিধ্বনি বলে। তার জন্যে প্রতিফলক-তলকে শ্রোতা থেকে একটা ন্যূনতম দূরত্বের বাইরে থাকতে হবে। কারণ শব্দানির্বন্ধের দরুন যে-কোন শব্দ অন্যটির 0.1 সেকেণ্ডের কম ব্যবধানে কানে পৌঁছলে তাদের আলাদা ব'লে বোঝা যায় না। কাজেই তার অর্ধেক সময়ে শব্দ যে দূরত্ব (≃ 56 ফিট) যায়, প্রতিফলক-তল কান থেকে অন্ততপক্ষে সেই দূরত্বে থাকা চাই। এই দূরত্বের অভাবেই হল্-ঘরে আমরা শব্দের একটানা গম্‌গম্ রূপে

প্রতিফলন শুনি। এই ঘটনাকে **অনুরণন** বলে। ২০ অধ্যায়ে আমরা এ-সম্বন্ধে আরো আলোচনা ক'রবো। মেঘের যে গুরুগুরু ধ্বনি শুনি তার উৎপত্তি অনুরণন থেকেই হয়। মেঘের বা বায়ুর নানা স্তর, পাহাড়, টিলা, বড় প্রাসাদ, বনের কিনারা, পাকা রাস্তা প্রভৃতি থেকে প্রতিফলিত হয়ে শব্দ পরম্পরা $\frac{1}{10}$ সেকেণ্ডের কম ব্যবধানে কানে পৌঁছেই এই ধরনের শব্দের অনুভূতি ঘটায়।

উদাহরণ: একসারি পাহাড়ের সামনে বন্দুক ছোঁড়া হ'ল। সেখান থেকে 300 ফিট দূরে একটি লোক সরাসরি শব্দ ও প্রতিফলিত শব্দ শুনলো। পাহাড় থেকে বন্দুকের এবং শ্রোতার লম্ব-দূরত্ব যথাক্রমে 225 এবং 300 ফিট। দেখাও যে, মূল শব্দ শ্রোতার কানে পৌঁছতে যা সময় লেগেছে, প্রতিধ্বনির তার দ্বিগুণ সময় লাগবে।

সমাধান: 9.7 চিত্রে HL পাহাড়ের সারি, G বন্দুকের এবং O

চিত্র 9.7—পাহাড়ে প্রতিফলিত শব্দ

শ্রোতার অবস্থান। সর্ত অনুসারে $OG = OL = 300$ ফিট এবং $GH = 225$ ফিট। দেখাতে হবে, $GM + MO = 2OG$।

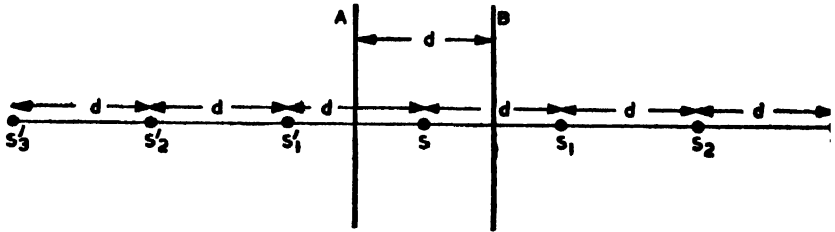
এখন শব্দরশ্মির HL প্রতিফলকের ওপর আপতন-বিন্দু M, কাজেই K, G-এর অলীক শাব্দবিম্ব। তাহলে $HK = HG = 225$ ফিট, $GM = MK$ এবং $GM + MO = OM + MK$.

এখন $OL = HH' = 300$ ফিট ; সুতরাং $GH' = 300 - 225 = 75$ ফিট। তাহলে $OH'^2 = OG^2 - H'G^2 = (300 + 75)(300 - 75)$

$$OK^2 = OH'^2 + HH'^2 = 375 \times 225 + (300 + 225)^2$$
$$= 375 \times 225 + 525 \times 525 = 75 \times 75\ (5 \times 3 + 7 \times 7)$$
$$= 75 \times 64 \times 75$$

$$\therefore \quad OK = 600 \text{ ফিট} = 2 \times GO$$

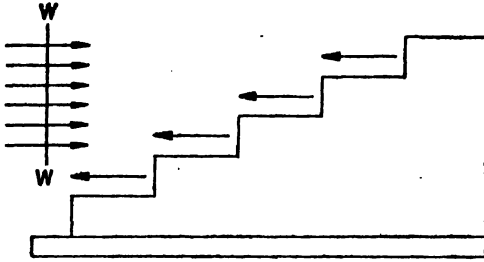
প্রতিধ্বনি নানা রকমের হয়। অনেকসময় তার উৎপত্তি, বিবর্তন বা বিক্ষেপণ থেকেও ঘটে। আমরা এদের কতকগুলি এখানে আলোচনা করছি।

সুরেলা প্রতিধ্বনি : লম্বা সরু সোজা পাকা-পথের দু'ধারে উঁচু মসৃণ দেওয়াল থাকলে যদি রাস্তায় হাততালি দেওয়া যায় তাহলে বারংবার (multiple) প্রতিধ্বনির দরুন অনেকসময় সুরেলা শব্দ শোনা যায় (9.8 চিত্র); d ব্যবধানে A ও B দুই সমান্তরাল দেওয়াল, S পর্যবেক্ষক। সে একবার হাততালি দিলে দুই দেওয়াল থেকে ক্রমিক প্রতিফলন হতে থাকবে। প্রথমে B-তে, পরে A-তে, আবার B-তে। B-তে ক্রমিক প্রতিফলনের দরুন S_1, S_2, S_3,··· একসারি অলীক শাব্দবিম্ব হবে। A-তে প্রথম প্রতিফলন হলে S_1', S_2' S_3',··· প্রভৃতি আর-একসারি বিম্ব হবে। তাদের প্রতি জোড়ার মধ্যে ব্যবধান d, এবং প্রতিটি বিম্ব এক-একটি স্বনকের কাজ করায় $2d/c$ কালান্তরে শব্দ কানে পৌঁছতে থাকবে। কাজেই শব্দের আবৃত্তি-অংক (frequency) হবে $c/2d$—তাই সুরেলা

চিত্র 9.8—আবৃত্ত প্রতিধ্বনি

প্রতিধ্বনির অনুভূতি জাগে। পর্যবেক্ষক যদি চলতে থাকেন তাহলে তাঁর পদক্ষেপের শব্দের প্রতিবিম্ব-সারি সমবেগে চলতে থাকে। দেওয়াল সমান্তরাল হলে শব্দের পৌনঃপুনিকত্ব অক্ষুণ্ণ থাকে।

পথের মাঝে শব্দ হলে, অপর প্রান্তে শ্রোতা দাঁড়িয়ে থাকলে, তিনিও এই সুরেলা প্রতিধ্বনি শুনবেন। এই ব্যাপারগুলিকে সরাসরি প্রতিফলন-সৃষ্ট **সুরেলা প্রতিধ্বনি** বলা চলে। কিন্তু দেওয়ালের বদলে যদি দু'সারি খাড়া রেলিং বা ধাতুদণ্ড (palings) থাকে তাহলেও এইরকম সুরেলা প্রতিধ্বনি শোনা যেতে পারে। এক্ষেত্রে ঘটে **বিক্ষেপণ** ; মূল শব্দশক্তির কিছু কিছু অংশ পরপর প্রতিটি খাড়া দণ্ড থেকে বিক্ষিপ্ত (scattered) হয়—তারা আসলে নতুন শব্দতরঙ্গের (গৌণ) উৎস হয়ে দাঁড়ায় এবং $2d \cos\theta/c$

কালান্তরে শ্রোতার কানে শব্দ পাঠাতে থাকে ; d এখানে দুই দণ্ডের মধ্যে ব্যবধান এবং θ তাদের সংযোগকারী সরলরেখা এবং দণ্ড থেকে শ্রোতার সংযোগকারী সরলরেখার মধ্যের কোণ ; কাজেই সুরেলা শব্দের পৌনঃপুনিকত্ব $c/2d \cos\theta$-র সমান হবে।

সোপান-প্রতিধ্বনি ঃ অনেক সময়ে লম্বা সিঁড়ির সামনে দাঁড়িয়ে হাততালি দিলে অবিচ্ছিন্ন সুরেলা প্রতিধ্বনি শোনা যায়। এখানে সিঁড়ির

চিত্র 9.9—সোপান-প্রতিধ্বনি

খাড়া ধাপগুলি এক একটি প্রতিফলকের কাজ করে (চিত্র 9.9)। সেখানে প্রতিফলকের গঠন, পর্যাবৃত্ত (periodic structure) বলা চলে ; প্রতিটি প্রতিফলন আগেরটির নির্দিষ্ট কাল পরে পরে হওয়ায় প্রতিফলিত তরঙ্গমুখগুলি পরপর কানে পৌঁছে একটানা পর্যাবৃত্ত সুরেলা শব্দের অনুভূতি জাগায়।

উদাহরণ ঃ একটি ছেলে সিঁড়ির সামনে দাঁড়িয়ে হাততালি দিয়ে সুরেলা প্রতিধ্বনি শুনতে পেল। শব্দের বেগ 1120 ফি/সে এবং সিঁড়ির ধাপ 10″ চওড়া হলে প্রতিধ্বনির কম্পাংক কত ?

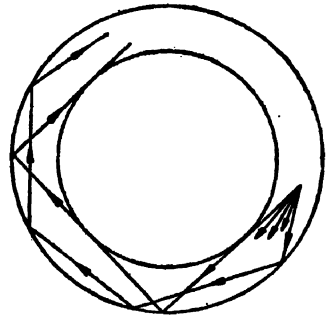
সমাধান ঃ পরপর দুটি ধাপের মধ্যে দূরত্ব 10″ ব'লে তাদের থেকে শব্দের প্রতিফলনের কালান্তর T, তার দ্বিগুণ দূরত্ব অর্থাৎ 20″ অতিক্রম করতে যে সময় লাগে তার সমান ; তাহলে

$\therefore\quad T=2d/c$ এবং শ্রুত শব্দের কম্পাংক $n=1/T=c/2d$

$$=\frac{1120\times12}{2\times10}=672/\text{সে}$$

এই ধরনের ঘটনাকে বিবর্তন বা বিক্ষেপণ-জনিত সোপান-প্রভাবও (echelon effect) বলা চলে।

সমমেল প্রতিধ্বনি : গোড়াতেই বলা হয়েছে যে, আপতিত শব্দের জাতি এবং প্রতিফলকের বৈশিষ্ট্য প্রতিধ্বনিকে ভিন্নরকম ক'রে দিতে পারে। অনেকসময়ে আপতিত শব্দে অনেকগুলি সমমেল (harmonics) থাকলে প্রতিফলিত শব্দের কম্পাংক এক বা দুই অষ্টক বেড়ে গেছে ব'লে মনে হয়। আসলে, মূল সুরের তুলনায় সমমেলগুলির কম্পাংক দুই-তিন গুণ বেশী হওয়ায় তাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্যও তুলনায় ছোট। তাই সীমিত প্রতিফলক থেকে ছোট তরঙ্গগুলির সুষ্ঠুতর প্রতিফলন হয়। র‍্যালে এই ব্যাপারে তাঁর আলোর বিক্ষেপণ-সূত্রের ($I \propto 1/\lambda^4$) নজির টেনে দেখান যে, প্রতিফলিত শব্দে হ্রস্ব তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তীব্রতাই (I) বেশী হবে, অর্থাৎ উঁচু সমমেলগুলিই জোরালো হবে। বনের সীমায় ঘন গাছের সারি থেকে সুরের অষ্টক প্রতিফলিত হতে দেখা গেছে। (বিক্ষেপণ-সূত্রটি ৯-৭ অনুচ্ছেদে উপস্থাপিত)

মৃদুভাষ বেষ্টনী (Whispering galleries) : লণ্ডনে সেণ্ট পল গির্জায় একটি বৃত্তাকার গ্যালারী আছে। তারই দেওয়ালের কাছে দাঁড়িয়ে মৃদুস্বরে কথা বললে গ্যালারীর বিপরীত দিকে দেওয়ালের কাছে সে-কথা স্পষ্ট শোনা যায় ; মাঝামাঝি জায়গায় বড় একটা শোনা যায় না। বৃত্তাকার বেষ্টনী বিশেষতঃ যদি গম্বুজ-সহ হয় তাহলে অনেক জায়গাতেই এই ব্যাপার ঘটতে দেখা গেছে। সীমাপ্রাচীরে পৌনঃপুনিক প্রতিফলনের জন্যই (চিত্র 9.10) এটা হওয়ার কথা। শাব্দস্থপতিবিশারদ স্যাবাইনের মতে গম্বুজাকৃতি গঠনে প্রাচীর ভেতরের দিকে হেলে থাকায় এই প্রভাব জোরদার হয়।

চিত্র 9.10—মৃদুভাষ বেষ্টনীতে প্রতিধ্বনি

র‍্যালের মতে, এই ঘটনা নিছক পৌনঃপুনিক প্রতিফলন-সৃষ্ট নয়। শব্দতরঙ্গ দেওয়াল ধ'রে তার বক্রতা বরাবর এগিয়ে অর্ধগোলকের অনুবন্ধী বিন্দুতে পৌঁছায়—এর মধ্যে বিবর্তন এবং ব্যতিচার দুইই সক্রিয়। রমন এবং সাদারল্যাণ্ড র‍্যালের সিদ্ধান্ত সমর্থন করেছেন। তাঁরা আবার প্রাচীরের ব্যাসার্ধ এবং স্পর্শক বরাবর শব্দের তীব্রতার পরিবৃত্তি (variation) পেয়েছেন, র‍্যালে-তত্ত্বে তার ব্যাখ্যা নেই।

হ্রস্ব বেতার-তরঙ্গের পাল্লা দূরপ্রসারী হওয়ার একটা কারণ আয়নমণ্ডল এবং ভূপৃষ্ঠের মধ্যবর্তী অঞ্চলের এই মৃদুভাষ বেষ্টনীর মতো আচরণ। হ্রস্ব ব'লেই এই দুই তলের মধ্যে এইজাতীয় তরঙ্গের বারবার প্রতিফলনে বিক্ষেপণ বা বিবর্তন সামান্যই হয় ; তাতে শক্তির স্বল্প অবক্ষয় হয় এবং তাই বেতার-তরঙ্গ বহুদূর যায়।

আমরা দেখেছি যে, ভূকম্পে Love-তরঙ্গ ভূপৃষ্ঠ বরাবর বহুদূর পর্যন্ত যায়। ভূকম্পবিদ্যার পথিকৃৎ জন মিল্‌নের মতে, যেকোন বড় ধরনের ভূকম্পে পৃথিবীর যেকোন জায়গায় ভূকম্পলিখ্‌ যন্ত্রে সাড়া মিলবেই। তার কারণ, ভূত্বক্ Love-তরঙ্গের ক্ষেত্রে অতি প্রকাণ্ড মৃদুভাষ-বেষ্টনীর সামিল।

প্রতিধ্বনির ব্যবহারিক প্রয়োগ অজস্র। সমুদ্রের গভীরতা, বা রাত্রে কি কুয়াশায় ডাঙা, পাহাড় বা তুষার-শৈলের অবস্থান-নির্ণয়ে প্রতিধ্বনি বহুকাল ধরেই নাবিকবন্ধু। আধুনিক কালে ডুবো-জাহাজ, মগ্ন শৈল, শত্রু-বিমান-সন্ধানে স্বনোত্তর গ্রাহক বা রাডার যন্ত্রের কাজ এই ঘটনারই মার্জিত ও সূক্ষ্ম প্রয়োগ। ২১ অধ্যায়ে সে-বিষয়ে কিছু আলোচনা হবে।

৯-৭. বিক্ষেপণ (scattering) :

আমরা আগেই জেনেছি যে, তরঙ্গের পথে প্রতিবন্ধক তার দৈর্ঘ্যের তুলনায় ছোট হলে, আপতিত তরঙ্গ চারিদিকে বিক্ষিপ্ত হয় ; বাধাগুলি যে নতুন গৌণ উৎসের মতো আচরণ করে, তা খাড়া দণ্ড বা রেলিং-এর সারি থেকে সুরেলা প্রতিধ্বনির উৎপত্তি আলোচনায় আমরা দেখেছি। র‍্যালে দেখিয়েছেন যে, তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) বাধার তুলনায় বড় হলে, বিক্ষেপিত তীব্রতা (I) কম্পাংকের চতুর্থ ঘাতের (n^4) অনুপাতে বাড়ে।

র‍্যালে সূত্র : কোন ছোট প্রতিবন্ধকের ওপর আপতিত তরঙ্গের বিস্তার (a_i) এবং বিক্ষেপিত তরঙ্গের বিস্তার (a_s) ধরলে, তাদের অনুপাত (a_s/a_i) নিশ্চয়ই প্রতিবন্ধকের আয়তনের (V) সমানুপাতে এবং দূরত্বের ব্যস্তানুপাতে বদলাবে, অর্থাৎ $a_s/a_i = kV/r$ হবে ; এখন ঘাত-বিচারে a_s/a_i ঘাতহীন শুদ্ধ সংখ্যা (L/L) অথচ V/r-এর ঘাত $= L^3/L$; সুতরাং ঘাতসাম্য রাখতে হলে r-কে কোন দৈর্ঘ্যের বর্গ (L^2) দিয়ে গুণ করা দরকার ; এখানে দৈর্ঘ্যবিশিষ্ট সম্ভাব্য রাশি, তরঙ্গদৈর্ঘ্যই হতে পারে।

$$\therefore \quad \frac{a_s}{a_i} = k\frac{V}{r\lambda^2} \quad \text{বা} \quad \frac{I_s}{I_i} = \left(\frac{a_s}{a_i}\right)^2 = k\frac{V^2}{\lambda^4 r^2} = \frac{kV^2.n^4}{r^2.c^4}$$

∴ বিক্ষিপ্ত তীব্রতা $I_s \propto n^4(V^2/c^4)$ (৯-৭.১)

এ-ছাড়া বিক্ষেপকের সংখ্যার (N) ওপরেও বিক্ষিপ্ত শক্তির মান নির্ভর করে।

৬-১১ অনুচ্ছেদে দেখেছি যে, শব্দের ক্ষীণীভবনের অন্যতম কারণ **র‍্যালে-বিক্ষেপণ**। তরলে বা গ্যাসে অসংখ্য ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র কণিকা মিশ্রিত (suspended) থাকলে উচ্চ কম্পাংকের শব্দের ক্ষীণীভবন এই কারণেই ঘটে; ঘন কুয়াশায় বা ঝিরঝিরে বৃষ্টির মধ্যে নিম্ন কম্পাংকের শব্দ শোনা সহজ কিন্তু উচ্চ কম্পাংকের শব্দ তা নয়। সমমেল প্রতিধ্বনির প্রধান কারণ ৯-৭.১ সমীকরণ। কোন কঠিনে যদি অসংখ্য ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র স্ফটিক থাকে তবে তাতে স্বনোত্তর তরঙ্গের তীব্রতা-হ্রাস এই র‍্যালে-বিক্ষেপণের জন্যেই হয়।

বায়ুমণ্ডলে এবং সমুদ্রগভীরে শব্দের বিক্ষেপণ : অশান্ত বায়ুমণ্ডলে 1 থেকে 10 kHz কম্পাংক-পাল্লায় শব্দপ্রেরণ বিশেষভাবে ব্যাহত হতে দেখা গেছে। গরম কালে বা বর্ষায় ঝড়ের সময়, এই কম্পাংকপাল্লায় শব্দের তীব্রতার উল্লেখযোগ্য হ্রাস হয়। অশান্ত বায়ুতে ঘূর্ণি থাকে ব'লে বিক্ষেপণ হয়েই এই ঘটনা ঘটে।

তত্ত্বানুসারে, তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) ঘূর্ণির ব্যাসের (R) তুলনায় বড় হলে বিক্ষেপণ সামান্যই হয়। যেটুকু হয়, তাও তরঙ্গ-অভিমুখের দিকে ক্ষুদ্র কোণমধ্যে সীমিত থাকে। যখন $\lambda \simeq R$, তখন ঘূর্ণির চতুর্দিকে মোটামুটি সুষমভাবেই শক্তির বিক্ষেপণ হয়, কিন্তু সবচেয়ে কম হয় অগ্রমুখেই। যদি অশান্তির মধ্যে বেগ-হ্রাসবৃদ্ধির বর্গের গড় মান $\bar{v}^2$ হয় তাহলে বিক্ষিপ্ত শক্তি $(\bar{v}/c)^2$ এর আনুপাতিক হয়।

সমুদ্র-গভীরেও এই বিক্ষেপণ হতে দেখা গেছে, তবে c-র মান অনেক বেশী হওয়ায় তার মান অল্পই হয়।

সমুদ্রজলে বুদ্‌বুদের উপস্থিতিতে শব্দতরঙ্গের বিক্ষেপণ হয়; উচ্চতর কম্পাংকে ($>10\ kHz$/sec) বিক্ষেপণ বেশী। এই ঘটনাকে কাজে লাগিয়ে আক্রান্ত জাহাজ শত্রু ডুবো-জাহাজকে এড়িয়ে পালায়। ডুবো-জাহাজ স্বনোত্তর তরঙ্গের প্রতিফলন (SONAR ব্যবস্থা § ২১-৯) কাজে লাগিয়ে জাহাজের অবস্থান নির্ণয় করে। তাই আক্রমণের আশংকা করলেই জাহাজ অসংখ্য বুদ্‌বুদ ছাড়তে থাকে; তাতে সোনার (SONAR) রশ্মি বিক্ষিপ্ত হয়ে তার শক্তি এত দুর্বল হয়ে যায় যে ডুবো-জাহাজের সন্ধানী যন্ত্রে যথোপযুক্ত সাড়া জাগাতে পারে না। অনেকসময় সমুদ্রের গভীরতা মাপতে গিয়ে দেখা

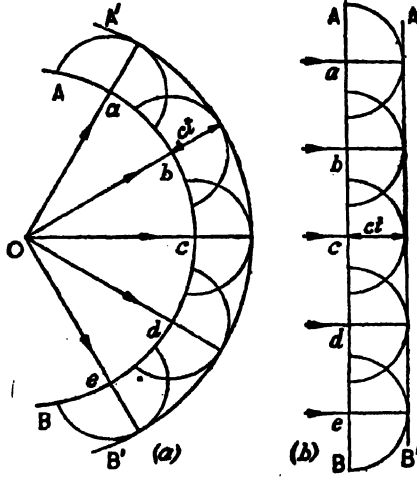
যায় যে, গভীরে শাব্দবিক্ষেপী স্তর প্রতিধ্বনির পথে বাধা হয়ে দাঁড়ায় ; সম্ভবত জলে অমিশ্রিত কণিকা বা সামুদ্রিক জীবকণিকার (plankton) উপস্থিতিতে এই ঘটনা ঘটে।

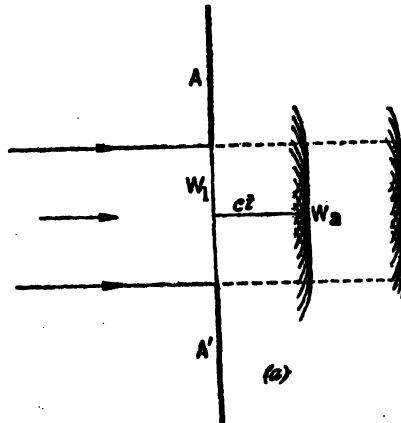
৯-৮. বিবর্তন :

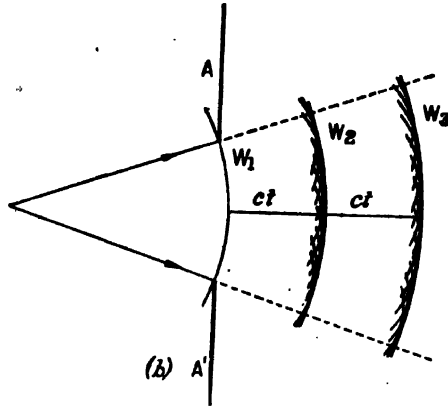
তরঙ্গমুখ অবাধে ব্যাপ্ত হতে থাকলে, তার যেকোন ছোট অংশ একটি সরলরেখা বা রশ্মি বরাবর এগোয়। পথে কোন বাধা পড়লে বা সচ্ছিদ্র পর্দা থাকলে, অর্থাৎ তরঙ্গমুখকে কোনভাবে সীমিত করলে, ব্যাপ্তি আর সরলরেখা বরাবর হয় না, তরঙ্গ এবং তার সঙ্গে শক্তির পার্শ্ববিস্তার ঘটে—তাকে আমরা **বিবর্তন** বলি। বিবর্তন তরঙ্গের বিশেষ ধর্ম—তবে তরঙ্গদৈর্ঘ্য বাধা বা ছিদ্রের সাপেক্ষে যত ছোট হয়, এই ধর্মের প্রকাশ ততই অস্পষ্ট হতে থাকে। শব্দতরঙ্গ সাধারণ বাধা সাপেক্ষে বড় ব'লে বিবর্তনধর্ম সুপ্রকাশ, আর আলোক-তরঙ্গ ছোট ব'লে এই ধর্ম অপ্রকাশ হয়। হ্রস্ব তরঙ্গমালা, রশ্মিগুচ্ছের মতো বিকিরিত হয় কিন্তু দীর্ঘ-তরঙ্গ বিবর্তন-ধর্মে চারিদিকে ছড়িয়ে পড়ে। তাই যেকোন দিকে শব্দের প্রতিফলন, প্রতিসরণ, বিকিরণ বা সন্ধান, বিক্ষেপণ, সর্বক্ষেত্রেই শব্দতরঙ্গের দৈর্ঘ্য এবং প্রতিবন্ধকের আপেক্ষিক মাপ নির্দেশ করতে হয়, কেননা প্রতিটি ক্ষেত্রেই বিবর্তন অল্পাধিকতরমাত্রায় উপস্থিত।

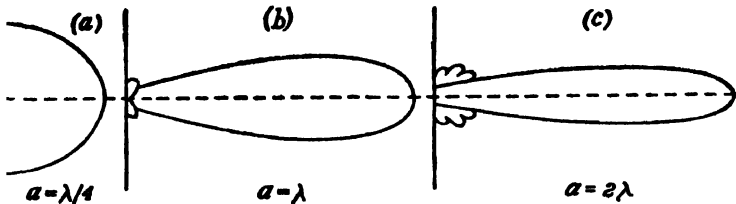
বিবর্তনের বিশ্লেষণ **হাইজেনস্-ফ্রেনেল নীতি** দিয়ে বোঝা সহজ। এই নীতির বিবৃতি—কোন তরঙ্গমুখের প্রতিটি বিন্দুকে নতুন আলোড়ন-কেন্দ্র ব'লে ধরা যায়। প্রতিটি আলোড়ন-কেন্দ্র থেকে গৌণ উপতরঙ্গগুলি সমান তরঙ্গবেগে মাধ্যমে ছড়িয়ে পড়ে ; তরঙ্গমুখ এবং কোন নির্দিষ্ট দিকের মধ্যবর্তী কোণ θ হলে, গৌণ উপতরঙ্গ দ্বারা আলোড়িত কোন মাধ্যমকণার সরণবিস্তার $(1+\cos\ \theta)$ রাশির সমানুপাতিক হবে। যেকোন বিন্দুটিই একাধিক গৌণতরঙ্গ দ্বারা বিক্ষুব্ধ হয় এবং সেখানে মোট সরণ এইসব সরণগুলির সদিশ্ (vector) সমষ্টির সমান। যেকোন মুহূর্তে সব-ক'টি গৌণতরঙ্গকে ছুঁয়ে যে স্পর্শকতলটি টানা যায়, সেটিই সেই মুহূর্তে তরঙ্গমুখের অবস্থান। তরঙ্গব্যাপ্তির অভিমুখের বিপরীত দিকে $\theta=\pi$ হওয়ায়, $1+\cos\ \theta=0$; ফলে পেছনদিকে তরঙ্গ যাবে না।

9.11 (*a*) চিত্রে AB যেকোন এক নিমেষে c বেগে চলমান গোলীয় তরঙ্গমুখের অবস্থান, O-তে তার উৎস ; তার ওপরে $a, b, c, d, \cdots$ প্রভৃতি আলোড়ন-কেন্দ্র থেকে গৌণ উপতরঙ্গের অর্ধবৃত্তগুলি আঁকা হয়েছে ; তাদের

ব্যাসার্ধ ct এবং $A'B'$ (তাদের সবার সাধারণ স্পর্শকতল), AB অবস্থানে পৌঁছবার t অবসর পরে তরঙ্গমুখের অবস্থান সূচিত করছে। $9.11(b)$

চিত্র 9.11—হাইজেন্‌স্‌-নীতি অনুসারে তরঙ্গ-প্রসারণ

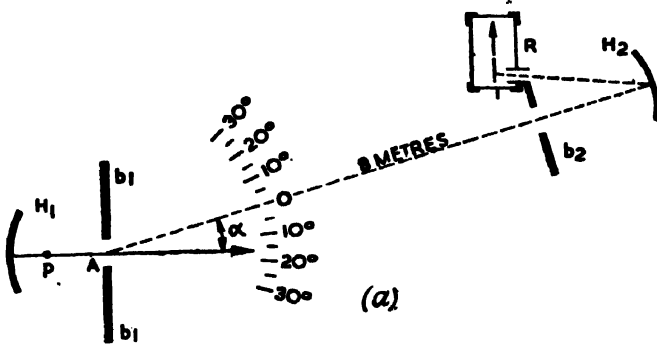
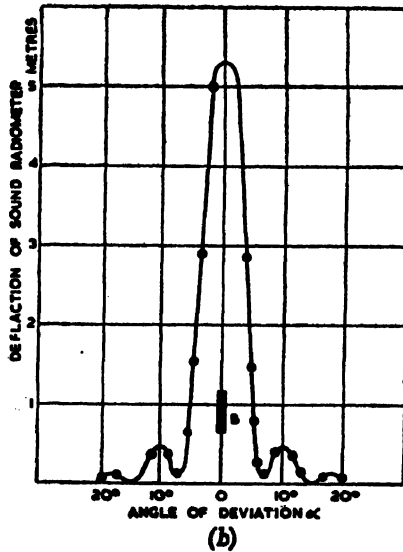
চিত্রে সেইভাবেই সমতলীয় তরঙ্গমুখের ক্রমিক অবস্থানগুলি দেখানো হয়েছে। 9.12 চিত্রে যথাক্রমে সমতলীয় ও গোলীয় তরঙ্গ প্রশস্ত রন্ধ্র অতিক্রম করলে

চিত্র 9.12(a)—রন্ধ্রপথে সমতলীয় তরঙ্গের বিবর্তন

কি-ভাবে তাদের পার্শ্ববিস্তার হয়, তা দেখানো হয়েছে। রন্ধ্র যত সরু হবে পার্শ্ববিস্তার ততই বাড়বে।

চিত্র 9.12(*b*)—রন্ধ্রপথে গোলীয় তরঙ্গের বিবর্তন

তরঙ্গ-উৎস খুব ছোট হলে প্রায় গোলীয় তরঙ্গ উৎপন্ন হয়। 9.13(*a*) চিত্রে উৎসারিত তরঙ্গে দিক্-সাপেক্ষে শক্তির বণ্টন দেখানো হয়েছে; উৎসব্যাস a এখানে সিকি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ($\lambda/4$) সমান। $a=\lambda$ হলে, অর্থাৎ

চিত্র 9.13—ধ্রুবীয় তন্ত্রে তরঙ্গ-দৈর্ঘ্য বনাম শক্তি-বণ্টন

দৈর্ঘ্য-সাপেক্ষে উৎসব্যাস বাড়লে শক্তির বেশীর ভাগ অগ্রিম (forward) দিকে সংহত হয়—পার্শ্ববিস্তার কমে এবং ছোট দুই পার্শ্বখণ্ডের (lobe) উৎপত্তি হয়। দৈর্ঘ্য-সাপেক্ষে উৎসব্যাস দ্বিগুণ হলে শক্তি অগ্রিম দিকে আরও সংহত হয়, অর্থাৎ রশ্মিগুচ্ছের অপসারিতা কমে, পার্শ্বখণ্ড আরও শীর্ণ ও অগ্রিমমুখী হয়। মূলবিন্দু থেকে শক্তিবণ্টন বক্রের যেকোন বিন্দুর, দূরকের (radius vector) দৈর্ঘ্য এবং লম্ব অভিমুখের সঙ্গে তার নতি, শক্তির ধ্রুবীয় বণ্টন নির্দেশ করে। এর থেকে বোঝা যায়, উৎস যত বড় হয়, তরঙ্গের রশ্মি-আচরণ ততই প্রকট হয়।

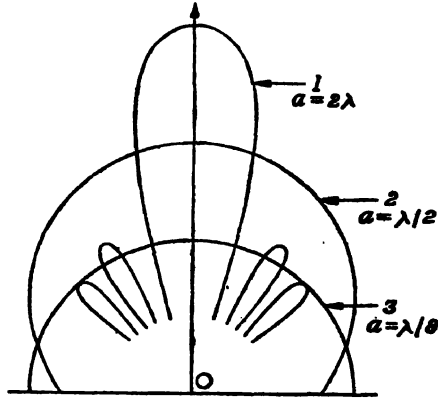
বিবর্তন-সংক্রান্ত পরীক্ষণ : 9.14 (a) চিত্রে আয়তরন্ধ্রের মধ্যে দিয়ে শব্দের বিবর্তন-পরীক্ষণ-ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে। H_1 অবতল দর্পণের ফোকাস P বিন্দুতে ; সেখানে উচ্চ কম্পাংকের গ্যাল্‌টন হুইশ্‌ল্ বাজালে শব্দতরঙ্গ আয়নায় প্রতিফলিত হয়ে সমতলীয় তরঙ্গের আকারে এগোয়। A আয়ত-

চিত্র 9.14 (a)—আয়তরন্ধ্রে বিবর্তনের পরীক্ষণ

রন্ধ্রের মধ্য দিয়ে গেলে এই শব্দতরঙ্গের বিবর্তন হয়। A-কে স্থির রেখে PA অক্ষসহ আয়না H_1 এবং দুই রন্ধ্র b_1, b_2-কে ঘোরানো যায়।

চিত্র 9.14 (b)—রেডিও-মিটারে বিক্ষেপ-কৌণিক বিচ্যুতি-লেখ

অবতল আয়না H_2, A থেকে আগত সমতলীয় তরঙ্গকে সংহত ক'রে রেডিও-মিটারের (R) গ্রাহক-চাকতিতে ফেলে। প্রথমে PA অক্ষ H_2-র অক্ষ বরাবর রাখা হয়; পরে ক্রমে ক্রমে দুই অক্ষের মধ্যে কৌণিক সরণ (α) বাড়ানো হয়। 9.14 (b) চিত্রে এই কৌণিক বিচ্যুতি α-র সঙ্গে রেডিও-মিটার দর্পণের বিক্ষেপের সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। R-এর বিক্ষেপ, সরাসরিভাবে H_2-তে আপতিত বিবর্তন-তরঙ্গের তীব্রতার সমানুপাতিক। স্বনক উচ্চকম্পাংক ব'লেই শব্দ সংকীর্ণ রশ্মিগুচ্ছে সীমিত রাখা গেছে।

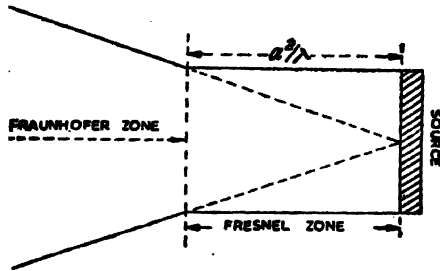
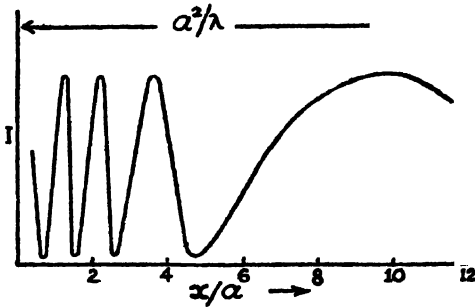
Grating-এর সাহায্যে পরীক্ষণ: অনেকগুলি সমান্তরাল খাড়া সমব্যবধান-যুক্ত আয়তরন্ধ্রের সমাবেশকে গ্রেটিং বলে। আলোর বর্ণালী-বীক্ষণে এটি বহুল ব্যবহৃত ও শক্তিশালী বিশ্লেষক যন্ত্র; সাধারণত কাঁচের পাতে এক সেন্টিমিটারে 1000 বা তদূর্ধ্ব দাগ টেনে এটি তৈরী করা হয়। শব্দতরঙ্গ অনেক দীর্ঘ ব'লে ব্যবধান অনেক বেশী রাখা যায়। বিজ্ঞানী Pohl, 5 সেমি তফাতে তফাতে ঋজু কাঠি বসিয়ে এইরকম সমতল গ্রেটিং তৈরী ক'রে ঠিক ওপরের পদ্ধতিতেই বিবর্তন কোণ (α) এবং শাব্দতরঙ্গের তীব্রতার সম্পর্ক অনুসন্ধান করেছেন। তাতে আলোকতরঙ্গের অবিকল আচরণই দেখা গেছে। আর এক গবেষক, কাচদণ্ড দিয়ে গ্রেটিং তৈরী ক'রে আলোর মতোই, L-C বর্তনীতে তীব্র তড়িৎমোক্ষণ-জনিত শব্দতরঙ্গের (§৬-১খ) তরঙ্গদৈর্ঘ্য মেপেছেন। বিজ্ঞানী ব্র্যাগ্‌ স্ফটিকের ভিন্ন ভিন্ন সমান্তরাল আণবিক স্তরকে **রঞ্জন-রশ্মির** প্রতিফলক গ্রেটিং হিসেবে ব্যবহার ক'রে তার তরঙ্গদৈর্ঘ্য মেপেছিলেন। র‍্যালে এবং টিন্‌ডালের পরামর্শমতো Pohl তাঁর উদ্ভাবিত ক'খানি গ্রেটিং পরপর সমান্তরালে বসিয়ে শাব্দক্ষেত্রে অনুরূপ পরীক্ষা ক'রে দেখিয়েছেন যে, রঞ্জন-রশ্মির মতোই মাত্র কয়েকটি নির্দিষ্ট প্রায়-সমকোণ আপতন-কোণে নিয়মিত প্রতিফলন হয় এবং শব্দতরঙ্গের স্পষ্ট **বিবর্তন-চক্র** (spots) মেলে।

আমরা 9.13 চিত্রে উৎসের ব্যাস-সাপেক্ষে শাব্দতরঙ্গের দৈর্ঘ্য অনুযায়ী বিবর্তনের রূপরেখা দেখেছি। এখন আয়তরন্ধ্রের বদলে যদি a ব্যাসার্ধের চক্র-রন্ধ্র বা বাধা, শব্দতরঙ্গ অতিক্রম ক'রে যায়, তাহলে ভিন্ন ভিন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের শাব্দতীব্রতার কৌণিক বণ্টন, ধ্রুবীয় তন্ত্রে কিরকম হয়, তা 9.15 চিত্রে দেখানো হয়েছে। দু'ক্ষেত্রের সাদৃশ্য লক্ষণীয়; $a \geqslant \lambda$ হলে, পার্শ্ববিস্তার $\theta = \sin^{-1} \lambda/a$-র মধ্যে সীমিত থাকে এবং কম হয়। রন্ধ্র ছোট হলে পার্শ্ববিস্তার বাড়ে এবং $a = \lambda$ হলে সমতলীয় তরঙ্গ বিবর্তিত হয়ে, গোলীয় তরঙ্গ হয়ে যায়।

তরঙ্গপথে বাধা থাকলে, সে কিনারার পেছনে অল্পবিস্তর ঢুকে পড়ে; দৈর্ঘ্য যত বেশী, বাঁকার পরিমাণও তত বেশী। শব্দতরঙ্গ দীর্ঘ ব'লে বাধার পেছনে সে বিবর্তিতও হয় বেশী। তাই শাব্দ ছায়াঞ্চল কখনই সুস্পষ্ট নয় এবং স্বনক চোখে না দেখলেও শব্দ শোনার কোন অসুবিধা হয় না। হ্রস্ব

চিত্র 9.15—তরঙ্গদৈর্ঘ্য সাপেক্ষে শাব্দতীব্রতা (ধ্রুবীয় তন্ত্র)

তরঙ্গের বিবর্তন কম ব'লে উচ্চ কম্পাংকের শব্দ বড় বাধার ছায়ায় বেশী ঢুকতে পারে না। তাই শাব্দ-ছায়ার ভেতরে যত ঢোকা যায় ততই আপতিত মিশ্র শব্দতরঙ্গের উচ্চতর সুরগুলি বাদ পড়ে এবং শব্দের জাতি পাল্টাতে থাকে।

অভিমুখী শব্দের বিকিরণ বা সন্ধানে বিবর্তনের প্রভাব: পছন্দমতো দিকে বিকিরিত শব্দের তীব্রতা বাড়াতে টিনের শংকু-চোঙ, মেগাফোন বা লাউডস্পীকার ব্যবহার করা হয়। স্বনোত্তর স্পন্দকের প্রথম উদ্ভাবক Langevin শব্দতরঙ্গকে নির্দিষ্টমুখী করতে এই ব্যবস্থাই ব্যবহার করেন। কোন নির্দিষ্ট দিকে শব্দপ্রেরণের আদর্শ গণিতীয় ব্যবস্থা পিস্টন-উৎস—একটি নলের মধ্যে দিয়ে কঠিন এক চাক্‌তির আনাগোনা। 9.16(a) চিত্রে এই উৎসের চিত্ররূপ দেওয়া হয়েছে। স্বনকের ব্যাস a এবং উৎপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ হলে, উৎস থেকে a^2/λ দূরত্বকে **নিকট** বা **ফ্রেনেল-অঞ্চল** এবং তার বেশী দূরত্বকে **দূর** বা **ফ্রাউনহোফার-অঞ্চল** বলে; নামগুলি, আলোর বিবর্তন ক্ষেত্র থেকে আমদানী। এখানে ফ্রেনেল-অঞ্চলে উৎপন্ন তরঙ্গমুখ সমতলীয়, ফ্রাউনহোফার-অঞ্চলে অপসারী হবে। শ্রবণগ্রাহ্য কম্পাংকের বেলায় দ্বিতীয়ের ভূমিকাই মুখ্য। 9.16(b) চিত্রে দেখা যাচ্ছে যে পিস্টনের অক্ষ (x) বরাবর

শাব্দতীব্রতা সমান নয় ; ফ্রেনেল-এলাকায় তীব্রতা কয়েকবার ওঠা-নামা করে এবং তারপরে ধীরে ধীরে কমতে থাকে। দূর অঞ্চলে তীব্রতা-মান, দূরত্বের

চিত্র 9.16(a)—শব্দ-বিকিরণে বিবর্তন অঞ্চল

চিত্র 9.16(b)—বিকিরণপথে শাব্দ-তীব্রতার পরিবৃত্তি

বর্গের ব্যস্তানুপাতিক। এই পরিবর্তনগুলি বিবর্তনের জন্যই হয় ; এবং শাব্দ ছায়াঞ্চলের মতোই একই কারণে, লাউডস্পীকার থেকে শব্দ-বিকিরণের পথে এক পাশ থেকে অন্য পাশে যেতে থাকলে শব্দের তীব্রতা ও জাতি দুইই ক্রমান্বয়ে বদলাতে থাকে। সুতরাং শ্রোতা যদি লাউডস্পীকার অক্ষ থেকে অনেক দূরে থাকেন তাহলে তিনি উচ্চকম্পাংকস্বনগুলি শুনতে পাবেন না এবং সঙ্গীত অস্বাভাবিক মনে করবেন। এক্ষেত্রে তরঙ্গদৈর্ঘ্য 3 সেমি থেকে 10 মি পর্যন্ত হয় এবং স্পীকার-পর্দার ব্যাস 30 সেমি মতো ধরা হয়েছে।

৯-৯. শব্দের প্রতিসরণ :

দুই মাধ্যমের শাব্দ বাধের (ρc) মান আলাদা হলে, তাদের সীমাতলে আপতিত শব্দের আংশিক প্রতিসরণ হয়। আপতন, লম্ব বরাবর না হলে, প্রতিসরণ স্নেলের সূত্র মেনে চলে, অর্থাৎ

$$\frac{\sin i}{\sin r}=\frac{c_1}{c_2}=\mu \qquad (৯\text{-}৯.১)$$

যে মাধ্যমে শব্দবেগ বেশী সেখানে প্রতিসৃত শব্দরশ্মি অভিলম্ব থেকে দূরে সরে যায়। জলে শব্দের বেগ বায়ুতে বেগের প্রায় চারগুণ এবং জলের ঘনত্বও অনেক বেশী। কাজেই শাব্দ মাধ্যম (ρc) হিসাবে বায়ু, জলের তুলনায় ঘনতর মাধ্যম (9.5 চিত্র), যদিও আলোর ক্ষেত্রে সে লঘুতর। আমরা ৯-৫.১০ সমীকরণের আলোচনায় দেখেছি যে সেই কারণেই বায়ু-মাধ্যম থেকে জল বা ধাতু-মাধ্যমে শব্দশক্তির সামান্যই প্রতিসৃত হয়।

আলোর মতো শব্দও লেন্স বা প্রিজমের মধ্য দিয়ে প্রতিসৃত হয় এবং একই জ্যামিতিক সূত্র মেনে চলে। কিন্তু তরঙ্গ দীর্ঘতর ব'লে বিবর্তন এড়িয়ে সুনিশ্চিতভাবে পরীক্ষা করা শক্ত; তবে পাতলা রবারের বেলুনে CO_2 গ্যাস ভ'রে তাকে আংশিকভাবে ফুলিয়ে শাব্দ-লেন্সের আকার দেওয়া হয়; বায়ুতে শব্দের বেগ, CO_2-তে শব্দবেগের 1.28 গুণ হওয়ায়, তার μ-মান 1-এর বেশী এবং লেন্স অভিসারী-ধর্মী। স্বনক হিসাবে গ্যাল্‌টন হুইশ্‌ল এবং সন্ধানী হিসাবে সুবেদী শিখা ব্যবহার ক'রে মোটামুটিভাবে রশ্মির অনুবন্ধী সূত্র

$$\frac{1}{v}-\frac{1}{u}=(\mu-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)=\frac{1}{f} \qquad (৯\text{-}৯.২)$$

প্রতিষ্ঠা করা গেছে। তবে আলোর মতো শাব্দ প্রতিবিম্ব তত স্পষ্ট বা সুনির্দিষ্ট নয়।

উদাহরণ : খুব পাতলা রবারের ব্যাগে 5 বায়ুমণ্ডলীয় চাপে CO_2 ভ'রে তার দুই তলের ব্যাসার্ধ যথাক্রমে 3 ও 2 ফিট করা হ'ল। গ্যাসে শব্দবেগ 260 মি/সে হলে, লেন্সের ফোকাস-দূরত্ব কত ?

সমাধান : বায়ুতে শব্দবেগ 332 মি/সে ধরলে, শাব্দ প্রতিসরাংক 332/260 = 1.28 (প্রায়)

$$\therefore \quad \frac{1}{f}=(\mu-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)=(\mu-1)\left(\frac{r_1+r_2}{r_1 r_2}\right)$$

$$\therefore \quad f=\frac{r_1 r_2}{(\mu-1)(r_1+r_2)}=\frac{6}{0{\cdot}28\times 5}=4.3 \text{ ফিট}$$

ঐ বেলুনেই হাইড্রোজেন রাখলে অপসারী লেন্সের কাজ হবে, কারণ হাইড্রোজেনে, শব্দ প্রায় 1300 মি/সে অর্থাৎ বায়ুর চেয়ে প্রায় চারগুণ বেগে

চলে। সাবানের বুদ্‌বুদে হাইড্রোজেন এবং NO_2 ভ'রে টিন্‌ডাল যথাক্রমে শব্দের অপসারী ও অভিসারী লেন্‌স তৈরী করেছিলেন। তবে রবারের এবং গ্যাসের ρc মানে অনেক তফাৎ থাকায়, বেলুন-তলে প্রতিফলন বেশী হয়ে প্রতিসৃত রশ্মিগুচ্ছ খুবই দুর্বল হয়ে যায়। আজকাল perspex বা polysterine-এর ব্যাগে গ্যাস ভ'রে, তাকে জলের মধ্যে রেখে এবং স্বনোত্তর তরঙ্গ ব্যবহার ক'রে যথাক্রমে লেন্‌স-তলে প্রতিফলন এবং তরঙ্গের বিবর্তন কমানো গেছে; তাতে শাব্দলেন্‌সে অনুবর্তী সম্পর্ক নিশ্চিতভাবে প্রতিষ্ঠিত হয়েছে। স্ফুলিঙ্গ-আলোকচিত্রের সাহায্যে প্রতিসৃত তরঙ্গের রূপরেখা দেখাও সম্ভব হয়েছে। শাব্দলেন্‌স তৈরী করতে সম্পূর্ণ অন্য নীতিও অনুসৃত হয়েছে, তবে তাকে এখনও সম্পূর্ণ সফল ব'লে ধরা যায় না।

Pohl এবং Sondhauss, হুইশ্‌ল এবং রেডিওমিটার বা সুবেদী শিখা দিয়ে শব্দতরঙ্গের প্রিজ্‌মীয় প্রতিসরণও প্রতিষ্ঠা করেছেন।

আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন : আলোর মতোই শব্দেরও ঘনতর মাধ্যম থেকে লঘুতর মাধ্যমে প্রতিসরণের ক্রান্তিক কোণ হয়। যেহেতু জলে বা যেকোন ধাতুতে শব্দ-বেগ, বায়ুমাধ্যমে বেগের চেয়ে অনেক বেশী, তাই বায়ু ঘনতর মাধ্যম। আলোর নজির টেনে ক্রান্তিক কোণের মান হিসাবে পাই $\theta=\sin^{-1}c_1/c_2$, সুতরাং বায়ু থেকে জলে বা ইস্পাতে শব্দ পড়লে ক্রান্তিক কোণ যথাক্রমে

$$\theta_W=\sin^{-1}\frac{331.5}{1497}\simeq 13^\circ \text{ এবং } \theta_S=\sin^{-1}\frac{331.5}{5150}\simeq 4^\circ$$

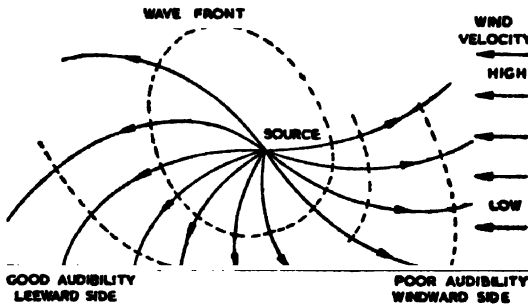
হবে। সমুদ্রজলে জলতল থেকে সহজেই শব্দের আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন হয় এবং গভীরে ভিন্ন ভিন্ন উষ্ণতা-স্তরেও তাই হওয়ায় পৌনঃপুনিক পূর্ণ প্রতিফলন (9.23 চিত্র) হতে থাকে; এতে অবক্ষয় খুবই সামান্য হওয়ায় সমুদ্রজল-তলের ঠিক তলা বরাবর বহু বহু দূর পর্যন্ত শব্দ যায়। সমুদ্র-গভীরে বিস্ফোরণ হাজার মাইল দূরেও ধরা পড়ে। মেগাফোন, কথন-নল বা ডাক্তারী স্টেথো-নলে বায়ু-ধাতু-বিভেদতলে আভ্যন্তরীণ পূর্ণ প্রতিফলন কাজে লাগানো হয়।

৯-১০. বায়ুমণ্ডলে শব্দের প্রতিসরণ :

বায়ুর ভিন্ন ভিন্ন স্তরে উষ্ণতা বা বায়ুবেগ ভিন্ন ভিন্ন থাকলে শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তিমুখ পাল্টে যায়। ফলে, শব্দ কতদূর পর্যন্ত শোনা যাবে তার বিস্তর

হেরফের ঘটে যায়। যেমন, অনেকসময় স্বনক কাছে থাকলেও শব্দ শোনা যায় না, আবার অনেকসময় স্বাভাবিকভাবে যে দূরত্বে শুনতে পাওয়ার কথা নয়, সে দূরত্বেও শব্দ শোনা যায়। দুই ঘটনাতেই, শব্দরশ্মি বা তরঙ্গমুখের পথ-পরিবর্তনের রূপরেখা একই ধরনের। উচ্চতা-সাপেক্ষে উষ্ণতাভেদ নিয়মিত হতে থাকলে প্রতিসরণ ঘটে। আবার স্তরভেদে বাতাসভেদ থাকলে তরঙ্গমুখের আকার বদলায় বটে, কিন্তু এই ঘটনাকে ঠিক প্রতিসরণ বলা যায় না।

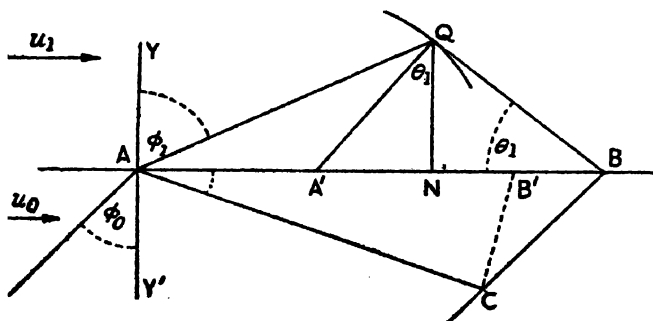
বায়ুমণ্ডলে স্তরভেদে বাতাস, উষ্ণতাভেদ, উচ্চতা এবং বিষমসত্ত্বতা থাকায় শব্দব্যাপ্তি নানা ভাবে প্রভাবান্বিত ও সীমিত হয়। আমরা একে একে সেগুলির ফল আলোচনা ক'রবো।

ক. বাতাস-অবক্রম : দৈনন্দিন অভিজ্ঞতা বলে যে, বাতাসের অনুকূলে শব্দ, বাতাসের প্রতিকূলের চেয়ে অনেক বেশী দূরেও শুনতে পাওয়া

চিত্র 9.17—শব্দপ্রসারে বাতাস-অবক্রমের প্রভাব

যায়। সাধারণত মাটি থেকে যত উঁচুতে ওঠা যায়, বাতাস (অর্থাৎ বায়ুবেগ) তত বাড়তে থাকে। ফলে, খাড়া সমতলীয় তরঙ্গমুখের ওপরের অংশ বাতাসের অভিমুখে তুলনায় দ্রুততর চলবে ; কাজেই ক্রমশঃ সেই অংশটি নীচের দিকে ঝুঁকে পড়তে (9.17 চিত্র) থাকবে ; বাতাসের বিপক্ষে ঠিক উল্টো ব্যাপার ঘটে। প্রথম ক্ষেত্রে শব্দরশ্মি নীচের দিকে নেমে আসে ; দ্বিতীয় ক্ষেত্রে ওপরের দিকে উঠে যায়। কাজেই বায়ুর অনুকূলে শব্দ অনেক দূর পর্যন্ত শোনা যায় ; তাই বাতাসের অভিমুখে মন্দির বা গির্জার ঘণ্টা, ট্রেনের হুইশ্‌ল বহু দূরেও শোনা যাবে। কিন্তু বায়ুর প্রতিকূলে চললে, শব্দরশ্মি উপরে উঠে যায় ব'লে, মাটিতে দাঁড়িয়ে থাকলে এই ধরনের শব্দ শোনা যায় না ; অথচ একই জায়গায় উঁচু বাড়ির ছাদে থাকলে শুনতে পাওয়া যায়। একই

কারণে বাতাসের প্রতিকূলে আগুয়ান শিকারীর পদশব্দ, মাটিতে বসে-থাকা পাখী বা ছোট জন্তু টের পায় না।

গণিতীয় বিশ্লেষণ : মাটি থেকে ওপরে উঠতে থাকলে বাতাস অর্থাৎ বায়ুবেগ যদি সমহারে (du/dh)। বাড়তে থাকে আর তরঙ্গের অপসারিতা যদি নগণ্য হয়, তাহলে সীমারশ্মি প্রথমে প্রায় $c(du/dh)$ ব্যাসার্ধের বৃত্তপথে উপরের দিকে উঠতে চাইবে। মাটির কাছে এই প্রবণতা সর্বাধিক ব'লে, প্রকৃত সঞ্চারপথ প্রায় পরবলয়াকৃতি (parabolic) হবে।

বার্টন হিসাব ক'রে দেখিয়েছেন যে, বায়ুর দুই স্তরে বাতাসভেদ যদি $\delta u(=u_1-u_0)$ হয় এবং সমতলীয় তরঙ্গমুখ AC যদি বিভেদতলের সঙ্গে θ_0 $(=\angle BAC)$ কোণ করে (চিত্র 9.18), তাহলে বিভেদতলের সঙ্গে প্রতিসৃত তরঙ্গমুখের (QB) নতিকোণ θ_1 $(=\angle ABQ)$ হবে

চিত্র 9.18—বাতাস-অবক্রমে শব্দপ্রসারের গণিতীয় বিশ্লেষণ

$$\operatorname{cosec}\theta_1=\frac{BA'}{A'Q}=\frac{B'A-AA'+B'B}{A'Q}=\frac{B'A}{B'C}-\frac{u_1t-u_0t}{ct}$$

[$B'C$ এবং $A'Q$ যথাক্রমে তরঙ্গমুখ AC এবং BQ-এর ওপর লম্ব]

$$=\operatorname{cosec}\theta_0-\frac{(u_1-u_0)}{c}$$

$$=\operatorname{cosec}\theta_0-(\delta u/c)$$

বা $$\operatorname{cosec}\theta_1-\operatorname{cosec}\theta_0=\delta u/c \qquad (৯\text{-}১০.১)$$

আর প্রতিসৃত শব্দরশ্মির প্রতিসরণ-কোণ হবে ϕ_1, যেখানে

$$\tan\phi_1=\tan AQN=\frac{NA}{NQ}=\frac{NA'}{NQ}+\frac{AA'}{A'Q\cos\theta_1}$$

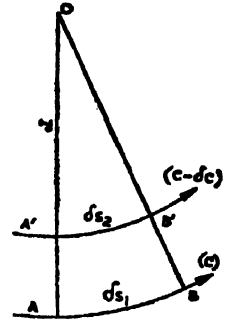
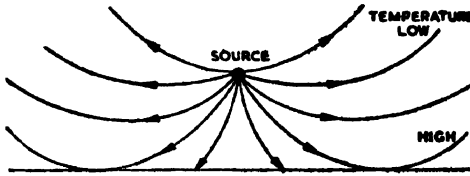
$$=\tan\theta_1+(u_1/c)\sec\theta_1 \qquad (৯\text{-}১০.২)$$

যদি এইরকম m-সংখ্যক ভিন্ন বেগের বায়ুস্তর থাকে, তবে পাব

$$\operatorname{cosec}\theta_m=\operatorname{cosec}\theta_0-\frac{u_m-u_0}{c} \qquad (৯\text{-}১০.৩ক)$$

এবং $$\tan\phi_m=\tan\theta_m+(u_m/c)\sec\theta_m \qquad (৯\text{-}১০.৩খ)$$

যদি প্রতিসৃত শব্দতরঙ্গমুখ খাড়া হয়, তবে $\theta_m=\pi/2$ হবে ; তখন $\operatorname{cosec}\theta_0-(u_m-u_0)/c=1$ হয় ; তাহলে আপতন-কোণের যে মানেই বাঁ দিক, 1-এর কম হবে, সেই মানেই শব্দের পূর্ণ প্রতিফলন হবে। যদি তরঙ্গমুখ অনুভূমিক হয়, তাহলে $\theta_0=0$ এবং $\operatorname{cosec}\theta_0=\infty$ হবে এবং θ_m সব স্তরেই শূন্য অর্থাৎ তরঙ্গমুখ সর্বদাই অনুভূমিক থাকে।

খ. উষ্ণতা-অবক্রম : বায়ুমণ্ডলে স্তরভেদে উষ্ণতাভেদ থাকলে উচ্চতার সঙ্গে শব্দবেগ বদলাবে। গরম হাওয়ায় শব্দ দ্রুততর ($c\propto\sqrt{T}$)

চিত্র 9.19(a)—উষ্ণতা-অবক্রম ও শব্দের প্রসারণ। চিত্র 9.19(b)—শব্দের রশ্মিপথ বক্রতা-ব্যাসার্ধ

চলবে, ঠাণ্ডায় মন্থরবেগে চলবে ; সুতরাং উষ্ণতা-অবক্রম থাকলে তরঙ্গমুখ বেঁকে যায় (চিত্র 9.19a) এবং শব্দরশ্মির পথ বক্রতা লাভ করে। ঘটনাটি বাতাস-অবক্রমেরই অনুরূপ। এই বক্রতার মান ৯-১০.৬-এ ব্যুৎপন্ন।

বায়ুস্তরগুলি অনুভূমিক এবং তারা ভিন্ন ভিন্ন উষ্ণতায় থাকলে, শব্দরশ্মি স্নেল সূত্রানুসারী হয়, অর্থাৎ

$$c_1/\sin\theta_1=c_2/\sin\theta_2=c_3/\sin\theta_3=\cdots$$

এখানে $c_1, c_2, c_3\cdots$ ইত্যাদি T_1, T_2, T_3, °$K\cdots$ প্রভৃতি উষ্ণতায় শব্দবেগ এবং $\theta_1, \theta_2, \theta_3\cdots$ ইত্যাদি, অনুক্রমিক স্তরে আপতন-কোণ।

9.19(b) চিত্রে $A'B'$ ও AB দুটি ক্রমিক শব্দরশ্মিপথ ; ধরা যাক, তাদের বক্রতা-ব্যাসার্ধ যথাক্রমে $(r-\delta r)$ এবং r, আর রশ্মি-বরাবর বেগ

$(c-\delta c)$ এবং c (কেননা dT/dh এখানে $-ve$) ; ধরা যাক, দুই স্বল্পদূরত্ব চাপ δs_1 এবং δs_2 সমান সময়ে অতিক্রান্ত হয়েছে। সুতরাং

$$\frac{\delta s_2}{c-\delta c}=\frac{\delta s_1}{c} \quad \text{বা} \quad \frac{\delta s_2}{\delta s_1}=1-\frac{\delta c}{c}$$

আবার অংকনানুসারে, $\dfrac{\delta s_2}{\delta s_1}=\dfrac{r-\delta r}{r}=1-\dfrac{\delta r}{r}$

$$\therefore \quad \text{বক্রতা } \frac{1}{r}=\frac{1}{c}.\frac{\delta c}{\delta r}. \qquad (৯\text{-}১০.৪)$$

এখানে (i) রশ্মিগুলি প্রায় অনুভূমিক $(\delta h \simeq \delta r)$ এবং (ii) $\delta T/\delta h$ সম্পর্কটি রৈখিক ধরলে, লেখা যায়

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{c_T}.\frac{\delta c}{\delta T}.\frac{\delta T}{\delta h} \qquad (৯\text{-}১০.৫)$$

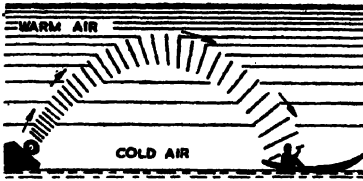
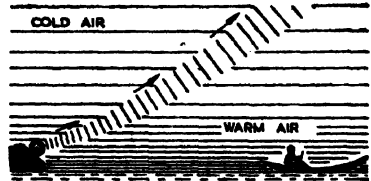
আবার $c \propto \sqrt{T}$ ব'লে, $\dfrac{c_T+\delta c_T}{c_T}=\sqrt{\dfrac{T+\delta T}{T}} \simeq 1+\dfrac{\delta T}{2T}$

$$\therefore \quad \frac{\delta c_T}{c_T}=\frac{\delta T}{2T} \text{ অর্থাৎ } \frac{1}{r}=\frac{1}{2}\frac{\delta T}{T.\delta T}.\frac{\delta T}{\delta h}$$

বা $$r=2T(\delta T/\delta h) \qquad (৯\text{-}১০.৬)$$

সাধারণত দিনের বেলায় উচ্চতা বাড়লে উষ্ণতা কমে ; ফলে, তির্যক শব্দরশ্মি ওপরের দিকে উঠলে বেঁকে যায়। ফলে, উৎস থেকে কিছু দূরে, মাটিতে দাঁড়িয়ে আর শব্দ শোনা যায় না। সেই দূরত্ব, শ্রোতার উচ্চতা এবং উষ্ণতা-ভেদের পরিবর্তন-হারের (dT/dh) ওপর নির্ভর করে। তখন শ্রোতা উৎসের কাছে থাকলেও শব্দ শুনতে পায় না, কারণ শব্দ তার মাথার ওপর দিয়ে চলে যায় (চিত্র 9.20b) ; ছবিতে ছোট ছোট রেখাগুলি তরঙ্গমুখের ক্রমিক অবস্থান নির্দেশ করছে।

পক্ষান্তরে, উচ্চতার সঙ্গে উষ্ণতা বাড়লে শব্দপথ নীচের দিকে বেঁকবে। কাজেই ওপরের দিকে যেসব শব্দরশ্মি ওঠে তারা অনুভূমিক পথে শব্দের চলার বাধা ডিঙিয়ে দূরের শ্রোতার কানে পৌঁছতে পারে। তাই দিনের বেলায় জলের ওপরে দূরে নৌকায়, তীর থেকে যে শব্দ পৌঁছায় না

[চিত্র 9.20(*b*)], রাতের বেলায় সেই শব্দই, উষ্ণতা-অবক্রম উল্টে যাওয়ায় সহজেই পৌঁছতে [চিত্র 9.20(*a*)] পারে। দ্বিতীয় ঘটনাটি আলোর ক্ষেত্রে হিমমরীচিকার সঙ্গে তুলনীয়।

(*a*) (*b*)

চিত্র 9.20—উষ্ণতা-অবক্রমে শব্দ-তরঙ্গের প্রতিসরণ-পথ

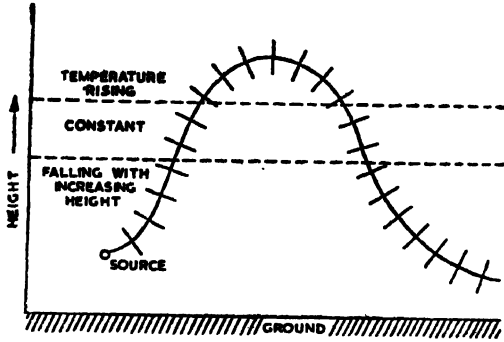
স্তব্ধমণ্ডলে (Stratosphere) **প্রতিসরণ: প্রচণ্ড বিস্ফোরণে সংশ্লিষ্ট নীরবতা-মণ্ডল:** এবার আলোচ্য, অস্বাভাবিক দূরত্বে শব্দ শুনতে পাওয়ার ঘটনা—তার হেতু, বহু উঁচুতে বায়ুস্তরে শব্দরশ্মির পূর্ণ প্রতিফলন। ঘটনাটি 9.20(*a*) চিত্রের অনুরূপ।

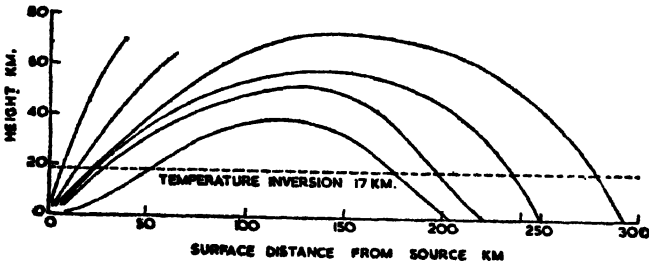
প্রচণ্ড বিস্ফোরণে উদ্ভূত অতি প্রবল শব্দের ব্যাপ্তির ব্যাপারে কয়েক রকমের ব্যতিক্রান্ত আচরণ দেখা গেছে—(১) উৎসের খুব কাছে শব্দতরঙ্গের অস্বাভাবিক রকমের বেশী গতিবেগ, (২) সেই অঞ্চল বেষ্টন ক'রে স্বাভাবিক শব্দবেগের দ্বিতীয় মণ্ডল, (৩) তার বাইরে নীরবতা মণ্ডল, (৪) আরও বাইরে আবার এক শ্রাব্যতা-মণ্ডল; এখানে শব্দের প্রাবল্য অস্বাভাবিক রকম বেশী, কিন্তু শোনা যায় দীর্ঘকাল পরে। প্রথম এলাকায় শব্দতরঙ্গ বিপুল-বিস্তার, সপ্তম অধ্যায়ে আলোচিত প্রসঙ্গ; দ্বিতীয় অঞ্চল স্বাভাবিক শ্রাবতা-মণ্ডল—মাটি ঘেঁষে শব্দতরঙ্গ যতদূর ছড়াতে পারে ততদূরই তার বিস্তৃতি। এই তরঙ্গকে **ভূ-তরঙ্গ** বলে—খুব জোর বিস্ফোরণেও 50 মাইলের বেশী পৌঁছয় না। ঊর্ধ্বমুখী শব্দতরঙ্গ ওপরে উঠে 20 থেকে 60 কিলোমিটারের মধ্যে বায়ুমণ্ডলের স্তব্ধস্তরে (stratosphere) উষ্ণতা-বৈপরীত্যের দরুন পূর্ণ-প্রতিফলিত হয়ে নেমে আসে এবং মোটামুটি 100 মাইলের বেশী দূরে ভূপৃষ্ঠে পৌঁছায় (চিত্র 9.21)।

প্রতিফলক-স্তরভেদে এরা ভিন্ন ভিন্ন দূরত্বে পরপর কয়েকটি নীরবতা- ও শ্রাব্য মণ্ডলের (9.22 চিত্র) উৎপত্তি ঘটাতে পারে। এখানে 50 কিমি পর্যন্ত (স্বাভাবিক শ্রাব্যতা-মণ্ডল) ভূ-তরঙ্গ যায়; তারপর প্রায় 200 কিমি পর্যন্ত

প্রথম নীরবতা-মণ্ডল। তারপর কয়েকটি নীরবতা- ও শ্রাব্য-মণ্ডল দেখানো হয়েছে।

9.21-22 চিত্রে প্রদর্শিত পথে শব্দের ভূপৃষ্ঠে ফিরে পৌঁছতে অনেকটা সময় লাগে এবং তার যথেষ্ট প্রাবল্যক্ষয় হয়। সুতরাং প্রচণ্ড শব্দ ছাড়া এই-

চিত্র 9.21—শব্দতরঙ্গ-মরীচিকা

রকম ঘটনা হতে পারে না। স্বাভাবিক শ্রাব্য-অঞ্চলের বাইরে প্রথম নীরবতা-অঞ্চলে, প্রায়ই যান্ত্রিক সন্ধানীযন্ত্রে বা গৃহপালিত পশুপাখীর আচরণে, অবস্বন-

চিত্র 9.22—প্রচণ্ড বিস্ফোরণে শাব্দ- ও নীরবতা-মণ্ডল

তরঙ্গের অস্তিত্ব ধরা পড়ে। তারপর অস্বাভাবিক শ্রাব্যতা-অঞ্চলে (প্রায় 100 মাইল দূরে) বহু পরে জোর শব্দ শোনা যায়। অবস্বন-তরঙ্গ কিন্তু এই অঞ্চলে অনেক আগেই মাটি ঘেঁষে সোজা পথে এসে পৌঁছয়। 9.22 চিত্রে এই ঘটনার কারণ নির্দেশিত হয়েছে। ভেতরের শ্রাব্যতা-মণ্ডলের আকারে উৎস-সাপেক্ষে অসামঞ্জস্য দেখা গেলেও, বাইরের শ্রাব্যতা-মণ্ডলগুলি সমঞ্জস আকারেই থাকে।

1883 সনে সুমাত্রা ও যবদ্বীপের মধ্যে ক্রাকাতোয়া আগ্নেয়গিরির

ইতিহাসের বৃহত্তম বিস্ফোরণে, অস্ট্রেলিয়ার ডারউইন বন্দরে (২,৪৪২ মাইল দূরে) পর্যন্ত শব্দ পৌঁছেছিল প্রায় ৯ ঘণ্টা পরে, মাঝে অনেকগুলি ক্রমিক নীরবতা- ও শাব্দ-অঞ্চল ছিল। তার পরে, প্রথম মহাযুদ্ধের সময়ে প্রচণ্ড কামানগর্জনে, সেই সময়ে ও পরে অস্ত্রাগারের বিস্ফোরণে এবং আকাশে প্রকাণ্ড উল্কাপিণ্ডের বিদারণের ক্ষেত্রেও এইরকম ক্রমান্বয়ে নীরবতা ও শ্রাব্যতার ঘটনা ঘটতে দেখা গেছে।

শব্দের এইজাতীয় ব্যাপ্তির ঘটনাকে, বেতারসংকেত-প্রেরণে দীর্ঘ ভূ-তরঙ্গের (Ground wave) প্রসার এবং হ্রস্ব আকাশ-তরঙ্গের (Sky wave) আয়নমণ্ডলে পূর্ণ-প্রতিফলন-হেতু অবতরণের সঙ্গে তুলনা করা চলে।

গ. বায়ুমণ্ডলে উচ্চতাভেদে উষ্ণতাভেদ : বায়ুমণ্ডলকে স্তরহিসাবে কয়েকটি অনুভূমিক মণ্ডলে ভাগ করা হয়েছে—তাদের উচ্চতা-ক্রমে ক্ষুব্ধস্তর (troposphere), স্তব্ধস্তর, আয়নমণ্ডল (ionosphere) প্রভৃতি বলে। মাটির খুব কাছে বায়ুস্তরের উষ্ণতার স্থানীয় অনিয়মিতা অগ্রাহ্য করলে, দেখা যায় যে, প্রায় 17 কিমি উচ্চতা পর্যন্ত উষ্ণতা ক্রমে ক্রমে -60° সে পর্যন্ত নামে ; এই অংশে উষ্ণতা-অবক্রম (dT/dh) ঋণাত্মক। তার উঁচুতে কিছুদূর পর্যন্ত উষ্ণতা স্থিরমান থাকে, তারপর বাড়তে বাড়তে 48 কিমি উচ্চতায় 0° সে পৌঁছয়। তারপর আবার কমতে কমতে 80 কিমি উচ্চতায় -90° সে উষ্ণতায় পৌঁছয়, তারপর আবার বাড়তে সুরু করে। 9.21 চিত্রে উচ্চতার সঙ্গে উষ্ণতাভেদ এবং তার ফলে বর্ধিষ্ণু এবং ক্ষয়িষ্ণু উষ্ণতা-অবক্রমে শাব্দ তরঙ্গমুখের পথ-পরিবর্তনগুলি দেখানো হয়েছে। বর্ধিষ্ণু-উষ্ণতা-অঞ্চলের কোন এক স্তরে নির্দিষ্ট কোণে চলমান তরঙ্গের পূর্ণ প্রতিফলন ঘটবে। স্বভাবতই শব্দরশ্মির প্রাথমিক নতিকোণের ওপরেই মোটামুটিভাবে প্রতিফলক-স্তরের উচ্চতা নির্ভর করবে। এই স্তরে রশ্মি অনুভূমিক এবং $\phi_m = 90^\circ$ হবে।

যদি ধরা যায় যে, 9.19(b) ছবির মতো AB রশ্মির প্রান্তীয় দুই লম্বের মধ্যে কোণ $(AOB) = \phi$ হয়, তাহলে

$$\frac{\partial c}{\partial r} = \frac{dc}{dy}\sin\phi \quad \text{এবং} \quad \frac{\partial c}{\partial s} = \frac{dc}{dy}\cos\phi \qquad (৯\text{-}১০.৭)$$

আবার ৯-১০.৪ সমীকরণ থেকে, $\dfrac{1}{r} = \dfrac{1}{c}\cdot\dfrac{dc}{dr}$ এবং $r.\delta\phi = \delta s$

$$\therefore \quad \frac{d\phi}{ds} = \frac{1}{r} = \frac{1}{c}\frac{\partial c}{\partial r} = \frac{1}{c}\cdot\frac{dc}{dy}\sin\phi = \frac{1}{c}\cdot\frac{\partial c}{\partial s}\tan\phi$$

বা $\cot\phi . d\phi = dc/c$; সমাকলন করলে পাবো

$$\log \sin\phi = \log c - \log k$$

বা $$\frac{c}{\sin\phi} = k \text{ (ধ্রুবক)} \qquad (৯\text{-}১০.৮)$$

দেখাই যাচ্ছে, $\phi = \pi/2$ হলে, রশ্মির গতিপথ অনুভূমিক হবে এবং $c = c_{max}$ হবে। ভূ-তরঙ্গের গতিবেগ (c) এবং শব্দরশ্মির প্রাথমিক নতিকোণ (ϕ) জানা থাকলে c_{max} নির্ণয় করা যায়। ভূপৃষ্ঠে উষ্ণতা $T°K$ হলে মোটামুটিভাবে $\sqrt{2}T$ উষ্ণতার স্তরে শব্দবেগ c_{max} হতে দেখা যায়।

বহিঃশ্রাব্যতা-অঞ্চলে, ৯-১০.৮ সমীকরণের সাহায্যে, সারি সারি করে সাজিয়ে শব্দরশ্মির পথ গণনায় স্থির করা হয়েছে। সেই পথপ্রকৃতি বিশ্লেষণ ক'রে পথশীর্ষের উচ্চতা, সেখানে উষ্ণতা, উচ্চতাভেদে উষ্ণতার পরিবর্তন এবং বিভিন্ন স্তরে বায়ুবেগ সম্বন্ধে বহু তথ্য জানা গেছে। যেমন, সমোষ্ণমণ্ডলের উচ্চতা প্রায় 30 কিমি, প্রায় 40 কিমি উচ্চতায় উষ্ণতা ভূপৃষ্ঠের সমান, শব্দরশ্মির চরম আরোহণ 45 থেকে 60 কিমির মধ্যে সীমাবদ্ধ, c_{max}-এর মান প্রায় 420 কিমি/সে, অর্থাৎ সেই স্তরে উষ্ণতা, হয় খুব বেশী, না হয় বাতাস খুব প্রবল ; এই বেগ ঋতুভেদে পরিবর্তিত হয়। নির্দিষ্ট উচ্চতায় গ্রেনেড ফাটিয়ে ভিন্ন ভিন্ন গ্রাহকযন্ত্রে শব্দ পৌঁছানোর মুহূর্ত এবং অভিমুখ থেকে, 80 কিমি উচ্চতা পর্যন্ত বায়ুমণ্ডলে উষ্ণতাভেদ এবং বায়ুবেগ মোটামুটি নির্ভুলভাবে বার করা গেছে।

ঘ. বায়ুমণ্ডলের বিষমসত্ত্বতা : বায়ুমণ্ডলের মধ্যে দিয়ে শব্দসংকেত-প্রেরণে বাধা দুস্তর। কুয়াশা-সাইরেনের ক্ষেত্রে (চিত্র ১১.৬) নীরবতা- ও শাব্দ-মণ্ডল লক্ষ্য করা গেছে। বায়ুতে জলীয় বাষ্প বেশী থাকলে শব্দের শোষণ বেশী হয় ; এ-ছাড়া স্তরভেদে বাতাসের অনিয়মিত পরিবর্তনও এর জন্য অনেকটা দায়ী। টিন্‌ড্যালের মতে, উষ্ণতাভেদের জন্য বায়ুতে খাড়া পরিচলন-স্রোত, ভিজা বায়ুস্রোত প্রভৃতি, শব্দের আন্তঃস্তর প্রতিফলন ঘটিয়ে যেন একটা শাব্দ-মেঘের সৃষ্টি করে ; তাকে ভেদ ক'রে শব্দরশ্মি যেতে পারে না। বিমান থেকে পর্যবেক্ষণ চালিয়ে, টাকার-ও এই সিদ্ধান্ত সমর্থন করেছেন। তিনি দেখিয়েছেন যে, (i) রৌদ্রকরোজ্জ্বল দিনে, যেখানে আলো অবাধে চলে, সেখানে প্রায়ই শাব্দমেঘের উৎপত্তি হয়ে শব্দচলাচল ব্যাহত হয়, অথচ (ii) দৃষ্টিরোধী কুয়াশা, শব্দের ব্যাপারে স্বচ্ছ। এ-ছাড়া বায়ুতে স্থানীয় ঘনত্ব-ভেদ এবং ঘূর্ণী অক্রম

থাকায়, শব্দপ্রেরণে নানা অনিয়মিত ব্যাঘাত ঘটে। ফলে, বায়ুমধ্যে শব্দসংকেত-প্রেরণব্যবস্থা প্রায়ই অনিশ্চিত হয়ে পড়ে এবং জোরালো শব্দের স্বাভাবিক শ্রাব্যতা-মণ্ডল, তত্ত্বসম্মত এলাকার তুলনায় অনেক ছোট হয়ে যায়।

৯-১১. সমুদ্রজলে শব্দের প্রতিসরণ ও অবক্ষয়:

বায়ুর তুলনায় সমুদ্রজলের মধ্যে দিয়ে শব্দসংকেতপ্রেরণ ঢের বেশী কার্যকরী। এই পার্থক্যের কয়েকটি সুনির্দিষ্ট কারণ আছে—

(১) সাগর-মাধ্যমের ওপরদিকে বিস্তৃতি সীমিত এবং সমুদ্রজলে শব্দের শোষণ অনেক কম ব'লে, তার অবক্ষয়ও কম; কাজেই সংকেতপ্রেরণপাল্লা অনেক বেশী। সমুদ্রে খুব গভীরে শব্দ-সৃষ্টি করা হয় না।

(২) জলে শব্দবেগ বায়ুতে বেগের চারগুণেরও বেশী, কাজেই তরঙ্গ সেই অনুপাতে দীর্ঘ। সুতরাং বিক্ষেপণে অবক্ষয় অনেক কম (λ^4-এর ব্যস্তানুপাত, ৯-৭.১ সমীকরণ)।

(৩) শব্দবেগ গভীরতা, উষ্ণতা ও লবণাক্ততা-নির্ভর। দূরপাল্লায় শব্দ-প্রেরণে উষ্ণতা-অবক্রম-জনিত প্রতিসরণের গুরুত্ব অনেক।

(৪) বায়ুর তুলনায় সমুদ্রজলের ঘনত্ব ও সমসত্ত্বতা ঢের বেশী, কাজেই বিক্ষেপণ কম।

(৫) অল্প দূরত্বের মধ্যে এবং হঠাৎ হঠাৎ বায়ুর মতো জলের উষ্ণতা বা স্রোত বদলায় না। দ্রুত জোয়ারের বেগও (3 মি/সে) শব্দবেগের (1445 মি/সে) তুলনায় নগণ্য। এইসব অস্থিরতা না থাকায় শব্দব্যাপ্তি বিঘ্নিত হয় না।

সমুদ্রজলেও শব্দবিস্তারের ক্ষয় সূচকসূত্রানুসারী এবং সেই অবক্ষয় সান্দ্রতা, তাপসঞ্চালন এবং পার্শ্ববিস্তৃতির জন্যই ঘটে। তবে এদের তুলনায় অনেক বেশী অবক্ষয় ঘটায় জলের মধ্যে অজস্র বায়ুপূর্ণ বুদ্‌বুদ; তাতে শোষণ খুব বেশী হয়।

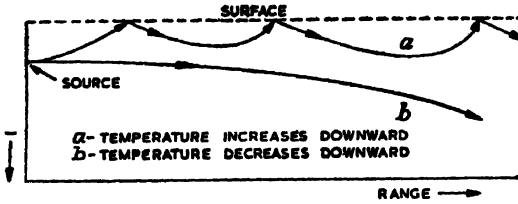
উষ্ণতা-অবক্রম-জনিত প্রতিসরণ: শব্দরশ্মি যদি এমন স্তরপরম্পরায় চলে যে তাদের প্রতিসরাংক কেবলই বদ্‌লাতে থাকে, তাহলে তার গোটা পথ জুড়েই, $c/\sin\phi =$ ধ্রুবক, সম্পর্কটি প্রযোজ্য। সমুদ্রজলে গভীরতার সঙ্গে উষ্ণতা নিয়মিত হারে কমতে থাকলে, কোন এক স্তরে পরম শূন্যে পৌঁছানোর

কথা। সেই স্তরে $y=0$ ধরলে, যেকোন স্তরে উষ্ণতা (T) গভীরতার সমানুপাতিক। তাহলে $c \propto \sqrt{T} \propto \sqrt{y}$; তাহলে

$$y = Kc^2 = k^2 \sin^2\phi \quad [\text{ ৯-১০.৮ থেকে }]$$

$$= \tfrac{1}{2}k(1-\cos 2\phi) \qquad (\text{ ৯-১১.১ })$$

এই সমীকরণ একটি আবর্তক (cycloid) নির্দেশ করে—সরলরেখার ওপর কোন বৃত্ত গড়াতে থাকলে, তার পরিধির যেকোন বিন্দুর সঞ্চারপথকে আবর্তক বলে।

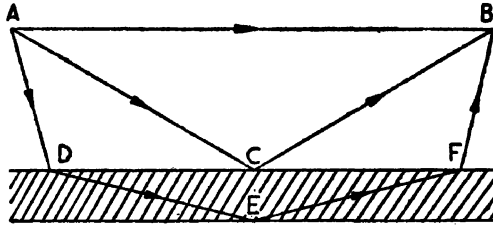
যদি সমুদ্রপৃষ্ঠে জল বেশী ঠাণ্ডা হয় তাহলে জলের তলায় উষ্ণতাক্রম বর্ধিষ্ণু ($+dT/dh$) থাকবে। সেক্ষেত্রে শব্দরশ্মিপথ মোটামুটিভাবে আবর্তক

চিত্র 9.23—সমুদ্রগভীরে উষ্ণতা-অবক্রম-জনিত শব্দের প্রতিসরণ

(9.23 চিত্রে a-চিহ্নিত) আকার হবে। সুতরাং কথন-নলের (speaking tube) মতোই বারবার প্রতিফলনের ফলে শব্দশক্তি একটি স্তরে সীমিত থাকবে, ফলে শব্দসংকেত বহুদূরে পৌঁছবে। জল যদি নীচের দিকে ক্রমশঃ ঠাণ্ডা হতে থাকে তাহলে dT/dh ক্ষয়িষ্ণু এবং শব্দরশ্মি ক্রমেই নীচের দিকে (b-চিহ্নিত পথে) নামতে থাকবে ; তখন শব্দ সীমিত দূরে পৌঁছবে। উৎস গভীরে নামালে পাল্লা বাড়বে।

গভীর সমুদ্রে শব্দপ্রেরণসীমা অনেক বেশী। জলের গভীরতার সঙ্গে উষ্ণতা কমতে কমতে 3.7° সে-এ স্থির হয়ে যায়, আর কমে না। সেই স্তরে সামান্য উন্নতি-কোণে শব্দতরঙ্গ পাঠালে, ওপরের গরম স্তরে পূর্ণপ্রতিফলিত হয়ে শব্দ নীচে নামবে ; আবার প্রেরণ-কোণ সামান্য অবনতিতে হলেও সে ওপরে উঠে আসবে, কারণ বেশী গভীরে শব্দ দ্রুততর চলে ব'লে পূর্ণপ্রতিফলন ঘটে। ফলে, অবম উষ্ণতাস্তরের ঠিক ওপরেই শব্দরশ্মি সীমিত থাকে। এই স্তরে বিস্ফোরণ হলে 1000 মাইল দূরেও সুবেদী বারিশব্দগ্রাহীতে তা ধরা পড়ে। এই স্তরে অবক্ষয়, দূরত্বের ব্যস্তানুপাতে হয়, তার বর্গের ব্যস্তানুপাতে নয়।

অস্বাভাবিক উষ্ণতা-অবক্রম থাকলে সমুদ্রপৃষ্ঠের কাছেও শব্দের পাল্লা এইরকম সুদূরবর্তী হতে দেখা গেছে।

৯-১২. শব্দের সাহায্যে সমুদ্রগর্ভের তথ্যানুসন্ধান :

সমুদ্রের তলায় মাটিতে আবার, শব্দবেগ জলের বেগের প্রায় দ্বিগুণ। জলের মধ্যে কোন বিন্দু A-তে (9.24 চিত্র) শব্দ হলে, শব্দরশ্মি তিনটি ভিন্ন পথ

চিত্র 9.24—সমুদ্রতলের মাটিতে শব্দের প্রতিসরণ

ধ'রে B বিন্দুতে পৌঁছতে পারে—(১) সরাসরি AB পথে, (২) C বিন্দুতে প্রতিফলিত হয়ে, এবং (৩) কাদার মধ্যে DEF পথে প্রতিসৃত হয়ে। শেষোক্ত পথে দ্রুততর গতিতে চলায়, B বিন্দুতে শব্দ AB পথের চেয়েও আগে পৌঁছতে পারে। অবশ্য B কাছে হলে সরাসরি শব্দই আগে পৌঁছবে। AB দূরত্ব বাড়তে থাকলে $(t_3 - t_1)$ অবকাশ ক্রমশই কমতে থাকে। AB-র কোন এক মাপে, AB এবং $ADEFB$ পথ যেতে শব্দের সমান সময় লাগে। AB আরও বাড়লে, প্রতিসৃত শব্দ আগেই B-তে পৌঁছয়। সমুদ্রগর্ভ সম্বন্ধে তথ্যানুসন্ধানে এই ঘটনা কাজে লাগানো হয়েছে।

কাদার ভেতরে শব্দ যদি ক্রান্তিক প্রতিসরণের ফলে সরাসরি DF পথে চলে, তাহলে $AB = d$, জলের গভীরতা h এবং ক্রান্তিক প্রতিসরণ-কোণ θ ধরলে, তাদের মধ্যে সম্পর্ক হবে

$$\frac{h}{d} = \frac{1-\sin\theta}{2\cos\theta} = \frac{1-(c_1/c_2)}{2\sqrt{1-(c_1/c_2)^2}} = = \tfrac{1}{2}(c_2 - c_1)^{\frac{1}{2}} \qquad (৯\text{-}১২.১)$$

প্রসঙ্গত উল্লেখ্য যে, ভূ-গভীরেও তৈলবাহী স্তরের গভীরতা-নির্ণয়ে এই সমীকরণের ব্যবহার হয়েছে। সরাসরি AB পথে যেতে শব্দের সময় (t_1) এবং $ADFB$ পথে যেতে সময় (t_3) সমান হলেই এই সূত্র প্রয়োগ করা যায়।

প্রশ্নমালা

১। শব্দতরঙ্গের পথে বাধা পড়লে কি কি ঘটনা ঘটে ? তাদের কি ক'রে আলাদা করা যায় ?

২। শব্দের এই আচরণগুলি বিশ্লেষণ করতে উপযুক্ত একটি একটি স্বনক ও সন্ধানী বর্ণনা কর।

৩। কি কি সর্তাধীনে শব্দতরঙ্গ কোন তল থেকে প্রতিফলিত হয় ? তলের প্রকৃতিভেদে শব্দের লম্ব-প্রতিফলনে কণাবেগ, দশাবেগ এবং শাব্দচাপের দশার কি কি পরিবর্তন হয়, তার গণিতীয় বিশ্লেষণ কর।

৪। বিস্তৃত প্রতিফলকে সমতলীয় শব্দতরঙ্গের তির্যক প্রতিফলন ও প্রতিসরণের গণিতীয় বিশ্লেষণ কর। এক্ষেত্রে প্রতিফলন ও প্রতিসরণ-গুণাংক আপতন-কোণের সঙ্গে কি-ভাবে বদলায় ? কি সর্তে জল-বায়ু-বিভেদতলে পূর্ণ প্রতিফলন ঘটে ?

৫। প্রতিধ্বনি কাকে বলে ? অনুরণনের সঙ্গে তার সম্পর্ক কি ? এর ব্যবহারিক প্রয়োগ কি ? বিশেষ ধরনের কয়েকটি প্রতিধ্বনির কথা বল। এদের উৎপত্তিতে বিবর্তন-ধর্মের কোন অবদান আছে কি ? ভূকম্পতরঙ্গ ও হ্রস্ব বেতারতরঙ্গ সুদূরপ্রসারী হওয়ার সম্ভাব্য কারণ কি ?

৬। শব্দতরঙ্গের বিক্ষেপণ কখন হয় ? বায়ুতে এবং সমুদ্রগভীরে শব্দের বিক্ষেপণের মৌলিক পার্থক্য কিছু আছে কি ? শব্দতরঙ্গ-বিক্ষেপণের কি কি ফল তুমি জান ?

বিক্ষেপিত শাব্দতীব্রতার একটি গণিতীয় ব্যঞ্জক প্রতিষ্ঠা কর।

৭। উদাহরণ দিয়ে স্বনকের খুব কাছে এবং বিস্তৃত বাধার কিনারায় শাব্দতরঙ্গের বিবর্তনের সংক্ষিপ্ত আলোচনা কর।

৮। বায়ুমণ্ডলে ও সমুদ্রগভীরে শব্দব্যাপ্তি এবং ব্যবহারিক তথ্য আহরণের সম্পর্কে আলোচনা কর।

১০

পর্যাবৃত্ত গতির সংশ্লেষ ও বিশ্লেষ

(Synthesis and Analysis of Periodic Motions)

১০-১. সূচনা :

এপর্যন্ত আমরা কোন মাধ্যমে একটি মাত্র শব্দতরঙ্গমালার ব্যাপ্তি (৬ ও ৭ অধ্যায়) এবং মাধ্যমে ছোট বা বড় বাধার উপস্থিতিতে সেই তরঙ্গমালার আচরণ (প্রতিফলন, বিক্ষেপণ এবং বিবর্তন) আলোচনা করেছি। পরবর্তী আলোচ্য বিষয়, একাধিক তরঙ্গমালার ক্রিয়ায় মাধ্যমের কোন একটি নির্দিষ্ট কণার আচরণ ; সেটি তরঙ্গের ব্যতিচার ধর্ম। সেই আলোচনার ভিত্তি, ভিন্ন ভিন্ন সর্তাধীনে একাধিক সরল দোলনের লব্ধিনির্ণয় অর্থাৎ **সরল দোলগতির সংশ্লেষ**। এই অধ্যায়ে তাই-ই আমাদের আলোচ্য।

সাধারণভাবে কিন্তু, শব্দ, বলতে কি খুব কম তরঙ্গই, সরল দোলজাতীয় হয়, যদিও তরঙ্গমালা প্রায়ই পর্যাবৃত্ত হয়ে থাকে (অভিঘাত শব্দ কিন্তু পর্যাবৃত্ত তরঙ্গমালা নয়)। ফরাসী বিজ্ঞানী ফুরিয়ার দেখিয়েছেন যে, পর্যাবৃত্ত গতিমাত্রেই যথাযথ বিস্তার ও দশাযুক্ত সরল দোলনের সমষ্টি। তাঁর উদ্ভাবিত উপপাদ্যের সাহায্যে যেকোন পর্যাবৃত্ত গতির বিশ্লেষণ করা যায়। এই উপপাদ্যের প্রয়োগক্ষেত্র বিচিত্র ও বহুমুখী—যেকোন জটিল শব্দের, আলোর বর্ণালীর, জটিল প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার, সাগরে জোয়ার-ভাঁটার, সৌরতাপে পৃথিবীর আবৃত্ত তাপনের এবং ভূকম্প-তরঙ্গের বিশ্লেষণে সে সমভাবেই সক্ষম। এই বিশ্লেষণের আর একটি বিশেষ আবেদন যে, মানুষের কানে শব্দবিশ্লেষণ এই পদ্ধতিতেই হয়ে থাকে। তাই **পর্যাবৃত্ত গতি-বিশ্লেষণের** বহু পদ্ধতির মধ্যে ফুরিয়ার-পদ্ধতির গুরুত্ব সবার চেয়ে বেশী। এই অধ্যায়ে আমরা তাও আলোচনা ক'রবো।

১০-২. সরল দোলনের সংশ্লেষের সম্ভাব্য বিভিন্ন প্রকরণ :

আমরা প্রথমে দুটি, পরে আরও বেশী সরল দোলন, কি ক'রে যোগ করা যায়, তা দেখব। তাদের সরণবিস্তার, কম্পাংক, দশা, গতিপথ একও হতে পারে ; সব-ক'টিই আলাদা-আলাদাও হতে পারে। নানা রকমের গতিপথের

মধ্যে মাত্র (১) একই বা সমান্তরাল পথে, আর (২) পরস্পর সমকোণে—এই দুটিই আমরা শিখব। আলো বা শব্দের ব্যতিচারের ঘটনায় প্রথম-জাতীয় এবং গতিবিদ্যায় ও আলোর ধ্রুবণের ঘটনায় দ্বিতীয় শ্রেণীর গতিপথে, একাধিক সরল দোলন হয়ে থাকে। সাধারণত দোলনগুলির কম্পাংক অভিন্ন কিন্তু দশা ও সরণবিস্তার আলাদা আলাদা ধরা হয়। তবে দরকারমতো আলাদা কম্পাংক বা সমান বিস্তারের একাধিক সরল দোলনের সংশ্লেষও আলোচনা করা হবে।

দোলন সদিশ্ রাশি, সুতরাং তাদের যোগ করতে ভেক্টরীয় যোগ-পদ্ধতি দরকার। আবার তারা প্রত্যাবর্তী রাশি, সুতরাং ত্রিকোণমিতিক যোগ-পদ্ধতিও প্রযোজ্য। দোলন পর্যাবৃত্ত সদিশ্ রাশি ব'লে, জটিল বীজগণিতের পদ্ধতিতেও তাদের যোগ করা চলে। মূলত তিন পদ্ধতিই একের ভিন্ন ভিন্ন রূপ ছাড়া আর কিছুই নয়। সুতরাং পদ্ধতি নির্বিশেষে যোগফল একই পাওয়া যাবে।

১০-৩. সম-কম্পাংক, সমরেখ, ভিন্ন দশা ও বিস্তারের দুই সরল দোলনের সংশ্লেষ :

ক. গণিতীয় পদ্ধতি : ধরা যাক, দুই সরল দোলন x-অক্ষ বরাবর ঘটছে এবং তাদের কৌণিক কম্পাংক $\omega = 2\pi n$; তাদের দোলন, অক্ষের দুই ভিন্ন বিন্দু থেকে সুরু হলে, দশা আলাদা আলাদা হবে এবং t অবসর পরে তাদের সরণ দাঁড়াবে যথাক্রমে

$$x_1 = a_1 \cos(\omega t + \delta_1) \qquad (১০\text{-}৩.১ক)$$

$$x_2 = a_2 \cos(\omega t + \delta_2) \qquad (১০\text{-}৩.১খ)$$

তাহলে
$$\begin{aligned} X = x_1 + x_2 &= a_1 \cos(\omega t + \delta_1) + a_2 \cos(\omega t + \delta_2) \\ &= \cos \omega t\, (a_1 \cos \delta_1 + a_2 \cos \delta_2) \\ &\qquad - \sin \omega t.\, (a_1 \sin \delta_1 + a_2 \sin \delta_2) \\ &= \cos \omega t.\, R \cos \phi - \sin \omega t.\, R \sin \phi \\ &= R \cos(\omega t + \phi) \qquad (১০\text{-}৩.২) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \quad R &= [(a_1 \cos \delta_1 + a_2 \cos \delta_2)^2 \\ &\qquad + (a_1 \sin \delta_1 + a_2 \sin \delta_2)^2]^{1/2} \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\delta_2 - \delta_1)]^{1/2} \qquad (১০\text{-}৩.৩ক) \end{aligned}$$

এবং
$$\begin{aligned} \phi &= \tan^{-1} \frac{a_1 \sin \delta_1 + a_2 \sin \delta_2}{a_1 \cos \delta_1 + a_2 \cos \delta_1} \\ &= \tan^{-1} \frac{a_2 \sin(\delta_2 - \delta_1)}{a_1 + a_2 \cos(\delta_2 - \delta_1)} \qquad (১০\text{-}৩.৩খ) \end{aligned}$$

যদি এদের সরণপথ y-অক্ষ বরাবর হয়, তাহলে দোলন-সমীকরণ হবে

$$y_1 = a_1 \sin(\omega t + \delta_1), \quad y_2 = a_2 \sin(\omega t + \delta_2).$$

$$\therefore \quad Y = R \sin(\omega t + \phi) \qquad (১০\text{-}৩.৪)$$

এই সংশ্লেষ, সরাসরি ত্রিকোণমিতিক পদ্ধতিতে দুই রাশির সংযোগ-ফল।

যদি আবার দোলনপথ x- বা y-অক্ষ বরাবর না হয়ে যেকোন এক সরলরেখা বরাবর হয়, তবে যেকোন নিমেষে সরণ ξ-কে x এবং y অক্ষ বরাবর দুই উপাংশের **জটিল** বা **সদিশ** সমষ্টি বলা যায়। তাহলে লব্ধি-সরণ হবে—

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = (x_1 + jy_1) + (x_2 + jy_2)$$
$$= (x_1 + x_2) + j(y_1 + y_2) \qquad (১০\text{-}৩.৫ক)$$
$$= X + jY = a_1 e^{j(\omega t + \delta_1)} + a_2 e^{j(\omega t + \delta_2)}$$
$$= e^{j\omega t}(a_1 e^{j\delta_1} + a_2 e^{j\delta_2}) \qquad (১০\text{-}৩.৫খ)$$

লব্ধি-সরণের দুই প্রতিরূপের বাস্তব এবং অলীক অংশ সমীকৃত করলে মিলবে

$$X = \text{Re}\,[e^{j\omega t}(a_1 e^{j\delta_1} + a_2 e^{j\delta_2}) \qquad (১০\text{-}৩.৬ক)$$

এবং $Y = \text{Im}\,[e^{j\omega t}(a_1 e^{j\delta_1} + a_2 e^{j\delta_2})$ (১০-৩.৬খ)

$$\therefore \quad X = \text{Re}\,[e^{j\omega t}\{(a_1 \cos\delta_1 + a_2 \cos\delta_2)$$
$$+ j(a_1 \sin\delta_1 + a_2 \sin\delta_2)\}] \qquad (১০\text{-}৩.৭ক)$$

এখন $e^{j\omega t}$ ঐকিক ভেক্টর, তার মাত্রা সব সময়েই 1, কিন্তু t বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে সে সমানে বামাবর্তে ঘুরে যাচ্ছে ; অর্থাৎ $e^{j\omega t}$ **ঐকিক ঘূর্ণ ভেক্টর** বা ঐকিক phasor—তার দশা অনবরতই বদলাচ্ছে ; তাহলে বন্ধনীর ভেতরে জটিল রাশির **মাত্রা** (modulus) হবে

$$R = [(a_1 \cos\delta_1 + a_2 \cos\delta_2)^2$$
$$+ (a_1 \sin\delta_1 + a_2 \sin\delta_2)^2]^{1/2}$$
$$= [a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\delta_2 - \delta_1)]^{1/2}$$

এবং তার **দশা** (arguement) বা কৌণিক অবস্থান হবে

$$\phi = \tan^{-1} \frac{a_1 \sin\delta_1 + a_2 \sin\delta_2}{a_1 \cos\delta_1 + a_2 \cos\delta_2}$$
$$= \tan^{-1} \frac{a_2 \sin(\delta_2 - \delta_1)}{a_1 + a_2 \cos(\delta_2 - \delta_1)} \qquad (১০\text{-}৩.৭খ)$$

জটিল রাশির মাত্রা ও দশা পূর্বলব্ধ ১০-৩.৩-এর ফলের সঙ্গে অভিন্ন। সুতরাং

$$X = \text{Re}\,(e^{j\omega t}.\, e^{j\phi}.R) = \text{Re}\,[e^{j(\omega t+\phi)}.R]$$
$$= R\cos(\omega t+\phi) \qquad (১০\text{-}৩.৮ক)$$

আবার $Y = \text{Im}\,(e^{j\omega t}.\, Re^{j\phi}) = \text{Im}\,(e^{j(\omega t+\phi)}.R)$
$$= R\sin(\omega t+\phi) \qquad (১০\text{-}৩.৮খ)$$

১০-৩.৮ক এবং ১০-৩.৮খ **জটিল বীজগণিতের পদ্ধতিতে** প্রাপ্ত সমরেখ দুই সরল দোলনের সংশ্লেষ-ফল নির্দেশ করে। লক্ষণীয় যে, তারা ত্রিকোণমিতিক পদ্ধতিতে পাওয়া ১০-৩.২ ও ১০-৩.৪-এর সঙ্গে অভিন্ন। লব্ধি-সরণও সরল দোলন, তবে তার বিস্তার (R) এবং দশা-কোণ (ϕ) কেউই আর অচর রাশি নয়, দুই স্পন্দনের দশাভেদের $(\delta_2-\delta_1)$ পর্যাবৃত্ত ফলন (১০-৩.৩খ এবং ১০-৩.৭খ)।

বিশেষ বিশেষ ক্ষেত্র : (১) দুই দোলন সমদশা হলে অর্থাৎ পথের একই বিন্দু থেকে কণা দুটি একযোগে একই দিকে চলতে সুরু করলে $\delta_2=\delta_1$; ১০-৩.৩ থেকে যথাক্রমে $R=a_1+a_2$ এবং $\phi=0$; ফলে ১০-৩.২ এবং ১০-৩.৪ থেকে আসছে

$$X=(a_1+a_2)\cos\omega t \text{ এবং } Y=(a_1+a_2)\sin\omega t \qquad (১০\text{-}৩.৯)$$

অর্থাৎ লব্ধি-সরণও সরল দোলন, এবং তার বিস্তার দুই বিস্তারের যোগফল। এই অবস্থায় আবার দুই দোলন সমবিস্তার হলে লব্ধিবিস্তার প্রত্যেকের দ্বিগুণ হবে।

(২) দুই দোলনে $\pi/2$ দশান্তর থাকলে অর্থাৎ একটি কণা অপরটির $T/4$ অবসর পরে দোলন সুরু করলে বা একটি যখন স্পন্দনপ্রান্তে, অপরটি তখন মধ্যকবিন্দুতে থাকলে

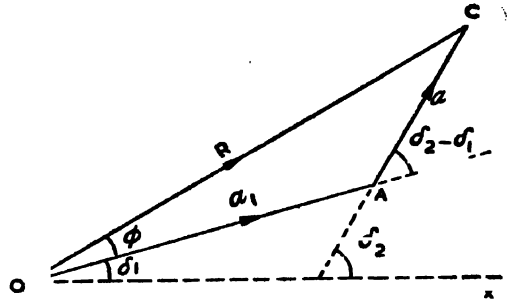
$$R=(a_1{}^2+a_2{}^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{এবং} \quad \phi=\tan^{-1}(a_2/a_1)$$
$$X=(a_1{}^2+a_2{}^2)^{\frac{1}{2}}\cos(\omega t+\tan^{-1}.\overline{a_2/a_1}),$$
$$Y=(a_1{}^2+a_2{}^2)^{\frac{1}{2}}\sin(\omega t+\phi) \qquad (১০\text{-}৩.১০)$$

(৩) দুই দোলন বিপরীত দশায় হলে, অর্থাৎ একসঙ্গে একই বিন্দু থেকে কণা দুটি একযোগে বিপরীত মুখে চলতে সুরু করলে, হবে

$$R=a_1-a_2,\quad \phi=(\delta_2-\delta_1)=\pi,$$
$$X=(a_2-a_1)\cos\omega t,$$
$$Y=(a_2-a_1)\sin\omega t \qquad (১০\text{-}৩.১১)$$

এই অবস্থায় দুই দোলনবিস্তার সমান হলে, $R=X=Y=0$ হয়, অর্থাৎ দুই দোলন পরস্পরকে প্রশমিত করে।

খ. লৈখিক পদ্ধতি ঃ দুই সরল দোলনের সদিশ্ যোগের দুটি ধাপ —(i) সামান্তরিক সূত্র প্রয়োগে লব্ধি-সরণের মান নির্ণয়, (ii) লব্ধি-সরণকে ঘূর্ণ সদিশ্ বা phasor হিসেবে ধ'রে সহ-বৃত্তের ওপর তার অভিক্ষেপ পাতন।

আগের উদাহরণে দুই সরল দোলনের বিস্তার যথাক্রমে a_1, a_2 এবং আদি দশা δ_1 ও δ_2 অর্থাৎ দশান্তর $(\delta_2-\delta_1)$, ছিল। x-অক্ষের সঙ্গে δ_1 কোণ ক'রে (10.1 চিত্র) a_1-এর আনুপাতিক দৈর্ঘ্যের OA রেখা টানা হ'ল, আর A প্রান্ত থেকে OA-র সঙ্গে $(\delta_2-\delta_1)$ কোণ ক'রে a_2-র অনুপাতে AC টানা হ'ল। তাহলে OC, লব্ধি-সরণ R-এর মান এবং $\angle AOC$, a_1-সাপেক্ষে R-এর দশান্তর (ϕ) নির্দেশ করবে ; অর্থাৎ দুই সরল দোলনের লব্ধি-সরণ, সদিশ্ রাশির মতো আচরণ করবে আর দশান্তর, দুই দোলনের প্রতিভূ সদিশ্ রাশি দুটির অন্তর্ভুক্ত কোণের সমান হবে।

চিত্র 10.1—সরল দোলনদ্বয়ের সংশ্লেষ (লৈখিক)

এখন ধরা যাক, 10.1 চিত্রে দুই দোলনের লব্ধি-সদিশের (R) আদি মুহূর্তে $(t=0)$ অবস্থান দেখানো হয়েছে। ১-৭ অনুচ্ছেদে দেখা গেছে যে, সহ-বৃত্তের সাহায্যে কি-ভাবে, সরল দোলনকে ব্যাসের ওপর বৃত্তীয় গতির অভিক্ষেপ ব'লে ধ'রে নিয়ে কাল-সরণ বক্র টানা যায় ; সেখানে AD রেখাকে সদিশ্ ঘূর্ণক (rotating vector) ধরা যায় এবং x বা y অক্ষের ওপর তার সরণশীল অভিক্ষেপ $a \cos \phi$ বা $a \sin \phi$-কে ঐ দুই অক্ষ বরাবর সরণশীল অভিক্ষেপ বলে মনে করা যায়। এই তথ্যগুলি কাজে লাগিয়ে সদিশ্ ঘূর্ণকের পদ্ধতিতে আমরা দুই সরল দোলনের যোগফল বার ক'রবো। 10.2 চিত্রে $t=0$ নিমেষে OA_1, OA_2 $(=A_1C)$ এবং OC যথাক্রমে a_1, a_2 এবং R-এর অবস্থান নির্দেশ করছে ; এখন t বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে OA_1

এবং OA_2 সমকৌণিক বেগে (ω) ঘুরতে থাকবে, সুতরাং তাদের মধ্যবর্তী কোণ ($\delta_2 - \delta_1$) অক্ষুণ্ণ থাকবে। অতএব সময় বাড়ার সঙ্গে সঙ্গে OA_1CA_2 চিত্রটিও একটা কঠিন ফ্রেমের মতোই ω সমকৌণিক বেগে ঘুরতে থাকবে। তাহলে x বা y অক্ষের ওপর OC-র অভিক্ষেপ [$R\cos(\omega t+\phi)$ বা $R\sin(\omega t+\phi)$-এর গতি], দুই দোলনের লব্ধি গতি নির্দেশ করবে। 10.3 চিত্রে এই লব্ধি-গতির কাল-সরণ-বক্র কি ক'রে আঁকা যায়

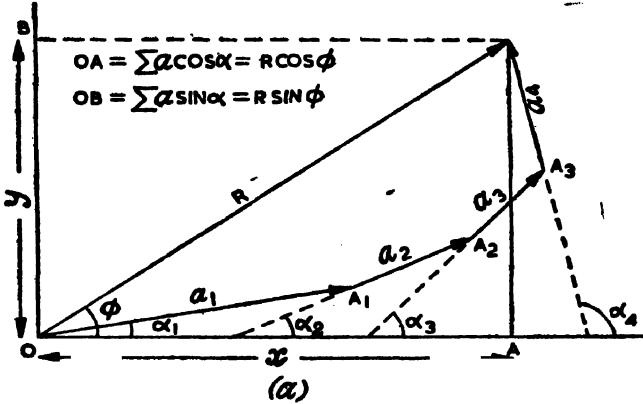
চিত্র 10.2—সরল দোলনের সংশ্লেষ (সদিশ, ঘূর্ণক পদ্ধতি)

চিত্র 10.3—লব্ধি-দোলনের কাল-সরণ-লেখ অংকন

তার নির্দেশ দেওয়া হয়েছে। একে ১০-৩.৪ বা ১০-৩.৮(খ) সমীকরণের লেখচিত্র বলা যায় ; দুটি দোলনই অবশ্য সমদশায় সুরু ($\phi = 0$) হয়েছে।

10.4(a) চিত্রে অনেকগুলি সরল দোলনের লব্ধিফল দেখানো হয়েছে ; তাদের সবার কম্পাংক সমান, কিন্তু বিস্তার ও আদিদশা আলাদা আলাদা। তখন লব্ধি-সরণ এবং দশাকোণ হবে যথাক্রমে

$$R^2=(a_1 \cos \alpha_1+a_2 \cos \alpha_2+\cdots)^2 +(a_1 \sin \alpha_1+a_2 \sin \alpha_2+\cdots)^2$$
$$=(\Sigma a \cos \alpha)^2+(\Sigma a \sin \alpha)^2$$

এবং $\phi=\tan^{-1} \Sigma a \sin \alpha/\Sigma a \cos \alpha$ (১০-৩.১২)

চিত্র 10.4(a)—বহু সরল দোলনের সংশ্লেষ

১০-৪. সমকম্পাংক, সমরেখ, সমদশান্তরী, সমবিস্তার বহু-সরল-দোলনের সংশ্লেষ :

এখন ভিন্ন ভিন্ন সরণগুলির সমীকরণশ্রেণী জটিল রূপে

$$x_1=ae^{j\omega t},\ x_2=ae^{j(\omega t+a)},\ x_3=ae^{j(\omega t+2a)},\cdots$$
$$x_n=ae^{j[\omega t+(n-1)a]}$$

ইত্যাদি, আকারে লেখা যায়। তাহলে তাদের লব্ধি-সরণ দাঁড়াবে

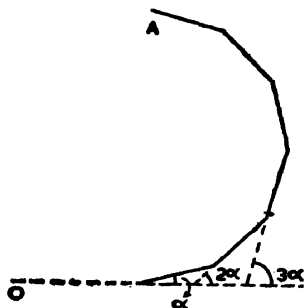
$$X=x_1+x_2+x_3+\cdots+x_n$$
$$=ae^{j\omega t}(1+e^{ja}+e^{j.2a}+e^{j.3a}+\cdots+e^{j(n-1)a})$$
$$=ae^{j\omega t}\frac{1-e^{jna}}{1-e^{ja}} \quad \text{[গুণোত্তর শ্রেণীর সমষ্টি]}$$
$$=Ze^{j\omega t} \qquad (১০-৪.১)$$

তাহলে বিস্তারমাত্রার বর্গ দাঁড়াবে

$$R^2=|ZZ'|=a^2\frac{1-e^{jna}}{1-e^{ja}}\cdot\frac{1-e^{-jna}}{1-e^{-ja}}=a^2\frac{1-\cos n\alpha}{1-\cos \alpha}$$

[কেননা $(1-\cos\theta)=\frac{1}{2}(e^{j\theta}+1)(e^{-j\theta}-1)$]

$$=a^2\frac{\sin^2 n\alpha/2}{\sin^2\alpha/2} \qquad (১০\text{-}৪.২)$$

যদি সম-অন্তর এবং সম-বেধের n-সংখ্যক সমতলীয় খাড়া আয়তরন্ধ্রের ওপর সমতলীয় তরঙ্গমালা লম্ব বরাবর আপতিত হয় তাহলে বিবর্তিত তীব্রতার মান ১০-৪.২ থেকে মেলে। এই ঘটনাই Fraunhofer বিবর্তন (৯-৮ অনুচ্ছেদ)।

চিত্র 10.4(b)—বহু-সমদশান্তরী অভিন্ন দোলন-সংশ্লেষ

প্রশ্ন : সম-কম্পাংকের এবং সমরেখ n-সংখ্যক সরল দোলনের লব্ধিফল নির্ণয় কর।

ইঙ্গিত : এখানে বিস্তার ও দশান্তর ভিন্ন ভিন্ন হবে। সুতরাং লৈখিক পদ্ধতির সাহায্য নেওয়াই ভাল। 10.4(b) চিত্রে তার আভাস দেওয়া হয়েছে—OA এখানে লব্ধি-সরণ হবে।

১০-৫. সমরেখ, সমদশা, ভিন্ন ভিন্ন বিস্তার ও কম্পাংকের সরল দোলনের সংশ্লেষ :

এক্ষেত্রে দুই সরল দোলনের সরণ সমীকরণ যথাক্রমে

$$x_1=a_1\cos\omega_1 t=a_1\cos 2\pi mt \qquad (১০\text{-}৫.১ক)$$

$$x_2=a_2\cos\omega_2 t=a_2\cos 2\pi(m+n)t \qquad (১০\text{-}৫.১খ)$$

ধরা যাক। তাহলে লব্ধি-সরণ হবে

$$\begin{aligned}x&=a_1\cos\omega_1 t+a_2\cos\omega_2 t\\&=a_1\cos 2\pi mt+a_2\cos 2\pi(m+n)t\\&=a_1\cos 2\pi mt+a_2\cos 2\pi mt.\cos 2\pi nt\\&\qquad -a_2\sin 2\pi mt.\sin 2\pi nt\\&=\cos 2\pi mt\,(a_1+a_2\cos 2\pi nt)\\&\qquad -\sin 2\pi mt.a_2\sin 2\pi nt\\&=\cos 2\pi mt.A\cos\phi-\sin 2\pi mt.A\sin\phi\\&=A\cos(2\pi mt+\phi)\end{aligned} \qquad (১০\text{-}৫.২)$$

এক্ষেত্রে লব্ধি-বিস্তার $A^2 = (a_1 + a_2 \cos 2\pi nt)^2 + (a_2 \sin 2\pi nt)^2$

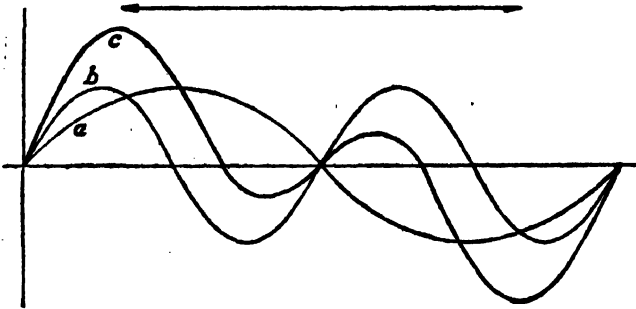
$$= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos 2\pi nt$$

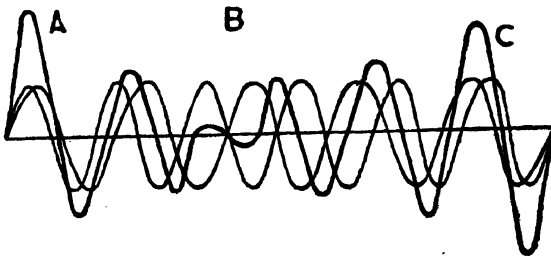
$$= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos (\omega_2 - \omega_1)t$$

(১০-৫.৩)

এবং দশাভেদ $\phi = \tan^{-1} \dfrac{a_2 \sin (\omega_2 - \omega_1)t}{a_1 + a_2 \sin (\omega_2 - \omega_1)t}$

(১০-৫.৪)

এখানে লব্ধি-বিস্তার বা দশান্তর দুইই সময়ের সঙ্গে বদলায়, সুতরাং লব্ধি-সরণ (x) আর সরল দোলন নয়। 10.5 চিত্রে এইরকম দুটি সরল দোলনের

চিত্র 10.5—ভিন্ন কম্পাংকের দুই সরল দোলনের সংশ্লেষ

লৈখিক যোগফল দেখানো হয়েছে। সুবিধার্থে তাদের (a, b) বিস্তার সমান ধরা হয়েছে। কাল-সরণ রেখা (c) আর সাইন-লেখ নয়—তার বিস্তার

চিত্র 10.6—স্বরকম্প

একান্তরী ভাবে পরিবর্তী (alternately varying) রাশি। সময় সাপেক্ষে সরণবিস্তারের এরকম হ্রাসবৃদ্ধির গুরুত্ব অনেক। সরল দোলনদ্বয় যথেষ্ট দ্রুত হলে অর্থাৎ তাদের কম্পাংক স্বনপাল্লায় পৌঁছলে, আর n-এর মান 10-এর কম থাকলে স্বরকম্প (১১-৪ অনুচ্ছেদ) শোনা যায়।

স্বরকম্পের তরঙ্গকম্পাংক সহজেই বার করা যায়। সুবিধার জন্য তাদের দুই দোলনবিস্তার সমান ধরলে, $x_1 = a \cos 2\pi m_1 t$ এবং $x_2 = a \cos 2\pi m_2 t$ নেওয়া যাক। তাহলে লব্ধি-সরণ হবে

$$x = a\,(\cos 2\pi m_1 t + \cos 2\pi m_2 t)$$
$$= 2a \cos \pi(m_1 + m_2)t.\ \sin \pi(m_1 - m_2)t \qquad (১০\text{-}৫.৫)$$

এর মধ্যে $2a \sin \pi(m_1 - m_2)t$ রাশিটি, তরঙ্গের পরিবর্তী বিস্তার এবং $\frac{1}{2}(m_1 + m_2)$ রাশিটি, তার সরল দোল-কম্পাংক। 10.6 চিত্রে স্বরকম্পের উৎপত্তি লেখচিত্রে দেখানো হয়েছে।

১০-৬. সমকোণে স্পন্দমান অভিন্ন-কম্পাংক সরল দোলনের সংশ্লেষ :

এখানে দুই দোলনের বিস্তার এবং দশা ভিন্ন ধরা হবে। তাদের সরণ-সমীকরণ যথাক্রমে

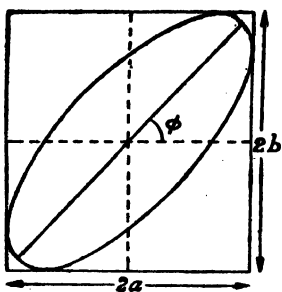
$$x = a \cos \omega t \qquad (১০\text{-}৬.১ক)$$
$$y = b \cos (\omega t - \alpha) \qquad (১০\text{-}৬.১খ)$$

$$\therefore \quad x/a = \cos \omega t$$

এবং $y/b = \dfrac{x}{a} \cos \alpha + \left(1 - \dfrac{x^2}{a^2}\right)^{1/2} \sin \alpha$

$$\therefore \quad \left(\frac{y}{b} - \frac{x}{a} \cos \alpha\right)^2 = \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) \sin^2\alpha$$

তাহলে $\dfrac{y^2}{b^2} + \dfrac{x^2}{a^2} - \dfrac{2xy}{ab} \cos \alpha = \sin^2\alpha \qquad (১০\text{-}৬.২)$

সমীকরণটি, $2a$ এবং $2b$ বাহুর এক আয়ত-ক্ষেত্রের মধ্যে সীমাবদ্ধ একটি উপবৃত্তের সমীকরণ। তার পরাক্ষ x-অক্ষের সঙ্গে 2ϕ কোণে (10.7 চিত্র) আনত এবং সেই কোণের মান

$$\phi = \tfrac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2ab}{a^2 - b^2} \cdot \cos \alpha \qquad (১০\text{-}৬.৩)$$

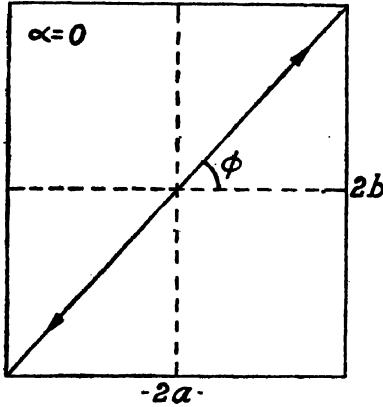
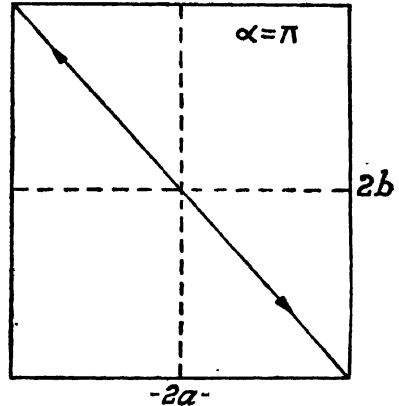
চিত্র 10.7—সমকৌণিক দুই সরল দোলনের লব্ধি-সঞ্চারপথ

বিশেষ বিশেষ দশাভেদ : (১) দোলন সমদশা হলে, $\alpha = 0$; তখন ১০-৬.২-এর রূপ হবে

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} = 0$$

বা $\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right)^2 = 0$ (১০-৬.৪ক)

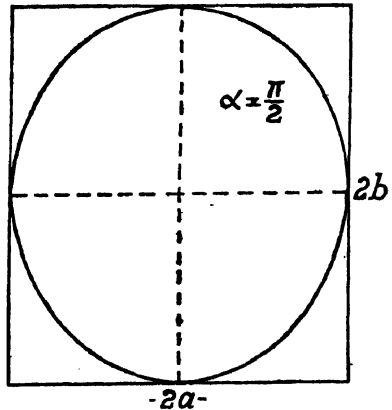
$\therefore \quad y = \frac{b}{a} x$ এবং $2\phi = \tan^{-1}(b/a)$ (১০-৬.৪খ)

তখন গতি সরলরৈখিক এবং দোলন সমবিস্তার হলে, আনতি-কোণ 45° (10.8*a* চিত্র)

চিত্র 10.8—নির্দিষ্ট কয়েকটি দশাভেদে সমকৌণিক দুই সরল দোলনের সংশ্লেষ

(২) দোলন বিপরীতদশা হলে, $\alpha = \pi$ এবং ১০-৬.৩ থেকে দাঁড়াবে

$$\left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right)^2 = 0 \quad \text{বা} \quad y = -\frac{b}{a} x \qquad (১০-৬.৫)$$

এক্ষেত্রেও দোলন সরলরৈখিক এবং আনতি-কোণ $\tan^{-1}(b/a)$ এবং সমবিস্তার দোলনের বেলায় 135° (10.8*b* চিত্র)।

(৩) দশাভেদ $\pi/2$ হলে, $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ (১০-৬.৬) হবে। এখানে দোলনপথ উপবৃত্তীয় এবং তার পরাক্ষ ($2a$) ও উপাক্ষ ($2b$) যথাক্রমে সরল দোলনের পথ বরাবর থাকবে (10.8*c* চিত্র)।

চিত্র 10.8(*c*)

(৪) দশাভেদ $\frac{1}{2}\pi$ এবং দুই বিস্তার সমান হলে,

$$x^2+y^2=a^2 \qquad (১০-৬.৭)$$

অর্থাৎ লব্ধি-দোলন তখন বৃত্ত বরাবর হবে। সরল দোলন ও চক্রগতির মধ্যে এই সম্পর্ক পরের অনুচ্ছেদে সম্প্রসারিত হবে।

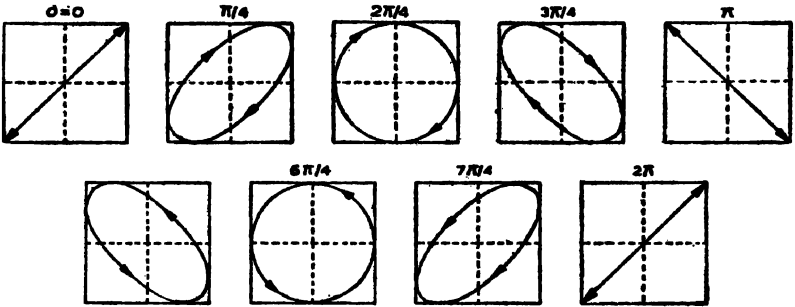
(৫) দোলন সমদশা, অসমবিস্তার এবং পর্যায়কালের অনুপাত 2 : 1 হলে, সরণ সমীকরণ

$$x=a \cos \omega t \; ; \; y=b \cos 2\omega t \qquad (১০-৬.৮ক)$$

হবে। তাহলে $\frac{x}{a}=\cos \omega t$ এবং $\frac{y}{b}=\cos 2\omega t$ (১০-৬.৮খ)

$$\therefore \quad y=b \cos^2\omega t=b\;(2 \cos^2\omega t-1)=2b\frac{x^2}{a^2}-b$$

এখানে দোলনপথ বদ্ধবক্র নয়—একটি মুক্তমুখ অধিবৃত্ত ; তার শীর্ষবিন্দু O, $-b$ বিন্দুতে (10.11b চিত্র) থাকবে।

10.9 চিত্রে $\alpha=0$ থেকে $\alpha=2\pi$ পর্যন্ত দশাভেদে লব্ধি-দোলনের প্রতিকৃতি পরপর কেমন কেমন হবে তা একত্র ক'রে দেখানো হয়েছে।

চিত্র 10.9—দশাভেদের সঙ্গে দোলনপথের পর্যাবৃত্তি

সমকোণে স্পন্দমান দুই সরল দোলনের পর্যায়কালে বা কম্পাংকে সামান্য ভেদ : এক্ষেত্রে লব্ধি-প্রতিকৃতি 10.9 চিত্রে বর্ণিত দশাগুলি একে একে বর্ণনা ক'রে বারবার একই চক্র রচনা করবে। স্বরকম্পে (10.6 চিত্র) যেমন একসঙ্গে সুরু হলেও দ্রুততর দোলন একটু একটু ক'রে মন্থরতর দোলনকে পেছনে ফেলে এগিয়ে যেতে থাকে, আর দশাভেদ বাড়তে বাড়তে এক পূর্ণ দোলন এগিয়ে গিয়ে সমদশায় পৌঁছয়, এক্ষেত্রেও তাই হবে। ছবিতে প্রতি ক্ষেত্রে দোলনপথ এবং দোলনের অভিমুখ দেখানো আছে। চক্র

পূর্ণ হতে যদি n সেকেণ্ড লাগে, তাহলে দুই দোলনের কম্পাংকভেদ $1/n$; কাজেই একটি দোলনের কম্পাংক জানলে, অপরটি বার করা যায়। সমকোণে দুই সরল দোলনের স্বল্প কম্পাংভেদ নির্ণয়ের এটি একটি ব্যবহারিক পদ্ধতি। আবার ঐ দুই দোলনই যদি সমরেখ হয়, তাহলে স্বরকম্পের সংখ্যা দিয়ে তাদের কম্পাংকভেদ অতি সহজেই বার করা যায় [১১-৫.৭ সমীকরণ ও ১১-৬ (২) অনুচ্ছেদ দেখ]। ১০-৮ অনুচ্ছেদে এই ব্যবহারিক পদ্ধতি বা Lissajous চিত্রাবলীর বিস্তারিত আলোচনা হবে।

১০-৭. সরল দোলগতি ও সুষম চক্রগতির মধ্যে সংশ্লেষ সম্পর্ক :

১-৫ অনুচ্ছেদে দেখেছি যে, সরল দোলগতি যেকোন ব্যাসের ওপর সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপ। এখন দেখব যে—

(১) দুই সমদশা, সমকম্পাংক, সমবিস্তার সরল দোলন সমকোণে হলে তাদের সংশ্লেষে সুষম চক্রগতি পাওয়া যায়। আগেই ১০-৬.৭ সমীকরণে সে-সিদ্ধান্তে আসা গেছে। আর

(২) বিপরীতমুখী, সমব্যাস, দুই সুষম চক্রগতির সংশ্লেষে সরল দোলনের উৎপত্তি হয়। কেননা,

সমবিস্তার ও সমকম্পাংক, সমকোণে দুই সরল দোলনের সরণের সমীকরণ যথাক্রমে $x=a\cos\omega t$ এবং $y=a\sin\omega t$; তাহলে লব্ধি-সরণ হবে

$$\xi=x+jy=a(\cos\omega t+j\sin\omega t)=ae^{j\omega t} \quad (১০\text{-}৭.১ক)$$

$$\therefore \qquad a^2=x^2+y^2 \quad (১০\text{-}৭.২)$$

অর্থাৎ লব্ধি-সরণবিস্তার বৃত্তব্যাসার্ধ। তা ছাড়া, স্বীকৃত চিহ্নপ্রকরণে $e^{j\omega t}$ বামাবর্তী একক সদিশ্ ঘূর্ণক। আবার সরল দোলনের সমীকরণ, সরণের অভিমুখ অনুযায়ী, $x=a\cos\omega t$ এবং $y=-a\sin\omega t$ হতে পারে। তখন

$$\xi=x-jy=a(\cos\omega t-j\sin\omega t)=ae^{-j\omega t} \quad (১০\text{-}৭.১খ)$$

এক্ষেত্রেও $a^2=x^2+y^2$, কিন্তু $e^{-j\omega t}$ দক্ষিণাবর্তী ঐকিক ঘূর্ণক। অতএব সমকৌণিক, সমকম্পাংক, সমবিস্তার দুই সরল দোলনের উপরিপাতনে অভিমুখ অনুযায়ী বামাবর্তী বা দক্ষিণাবর্তী সুষম চক্রগতি মেলে।

আবার বিপরীত আবর্তী, সমব্যাস দুই সুষম চক্রগতি যোগ করলে, মিলবে

$$ae^{j\omega t}+ae^{-j\omega t}=(x+jy)+(x-jy)=2x \quad (১০\text{-}৭.৩ক)$$

আবার $a(e^{j\omega t}+e^{-j\omega t})=a\,(\cos\omega t+j\,\sin\omega t)$

$+a\,(\cos\omega t-j\,\sin\omega t$

$=2a\,\cos\omega t$ (১০-৭.৩খ)

$\therefore\quad x=a\,\cos\omega t$ (১০-৭.৪)

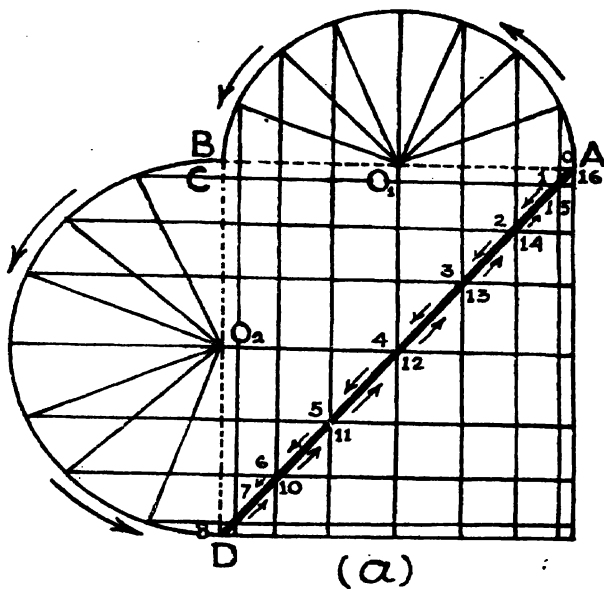
এই সমীকরণ সরল দোলনের সরলতম রূপ। উৎপন্ন সরল দোলনের সরণ-বিস্তার, চক্রপথের ব্যাসের সমান এবং দুয়ের পর্যায়কাল অর্থাৎ কম্পাংক, সমান।

১০-৮. লিসাজু-লেখচিত্রাবলী :

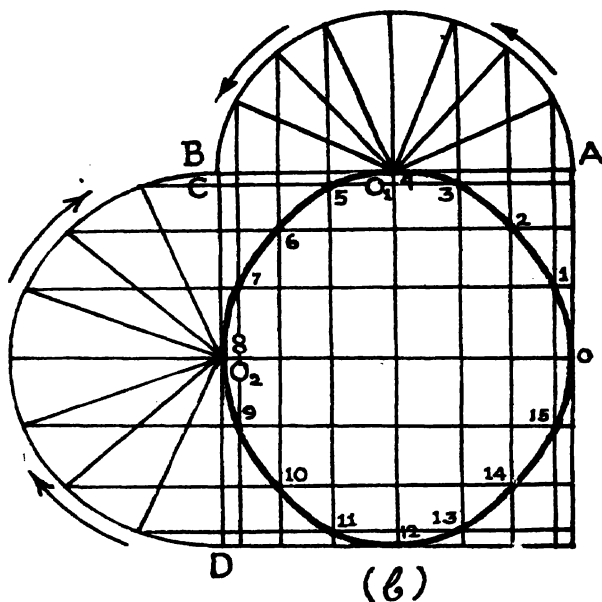
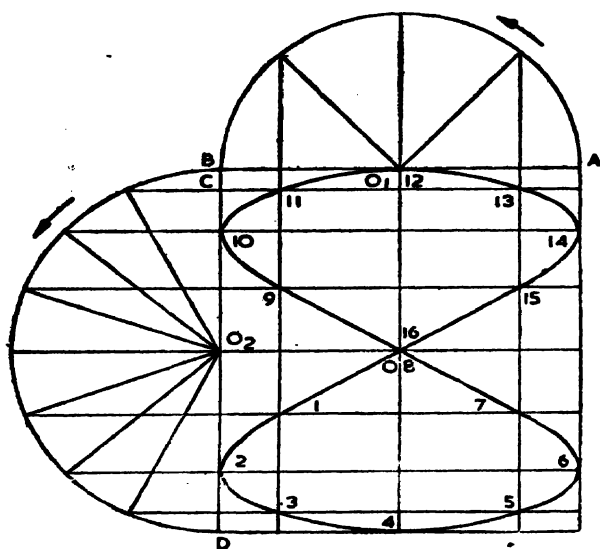
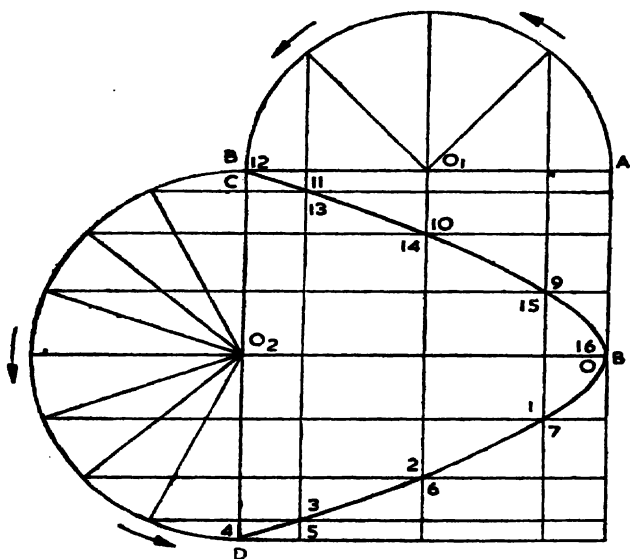
সমকৌণিক দুই সরল দোলনের সংযোগে যে লব্ধি-সরণ হয়, তার সরণ-কাল লেখচিত্র, তাদের আবিষ্কর্তা লিসাজু-র নামে পরিচিত। যেখানে দুই কম্পাংকের অনুপাত, দুই অখণ্ড ক্ষুদ্র সংখ্যার অনুপাতের সমান—সেই লিসাজু-চিত্রগুলিই বেশী গুরুত্বপূর্ণ। এই অনুপাতের মান, আদি মুহূর্তে কণা-অবস্থান এবং তাদের দশাভেদের ওপর, লেখগুলির আকার ও পরিসীমা নির্ভর করে। এদের আঁকা হয় যে নীতিতে, সেটি হ'ল **সরল দোলনমাত্রেই কোন ব্যাসের ওপর সুষম চক্রগতির অভিক্ষেপ।**

(১) **কম্পাংক সমান** হলে, সংশ্লেষ করতে সমকোণে AB ও CD (10.10 চিত্র) রেখা টানো, তাদের দৈর্ঘ্য দোলনের বিস্তারের দ্বিগুণ ; এদের ব্যাস ধ'রে অর্ধবৃত্ত টানলে, তারা দুই সরল দোলনের সহবৃত্তের কাজ করবে। পরিধিগুলিকে সুবিধামতো সমান ভাগে (এখানে আট) ভাগ ক'রে নিজ নিজ ব্যাসের ওপর সমসংখ্যক অভিক্ষেপ টেনে বাড়িয়ে দিলে তারা ছেদ করবে। এখানে দোলন যথাক্রমে AO_1B এবং CO_2D বরাবর ধরা হয়েছে এবং B ও C উপরিপাতিত।

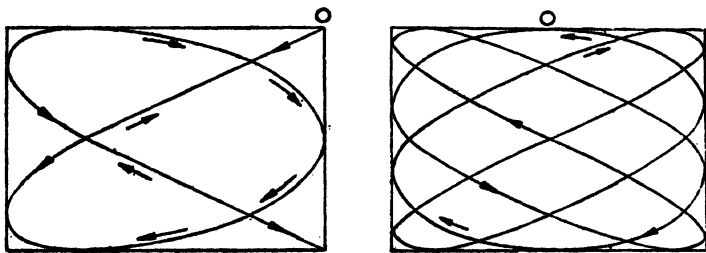
দোলন সমদশায় সুরু হলে, $(t=0)$ A এবং C বিন্দু (10.10*a* চিত্রে) থেকে টানা অভিক্ষেপদ্বয় 0 বিন্দুতে ছেদ করে ; $T/16$ অবসর পরে তারা 1-চিহ্নিত বিন্দুতে ছেদ করে। এইভাবে $T/2$ অবসর পরে তারা 8-চিহ্নিত বিন্দুতে ছেদ করে ; তারপরে ছেদবিন্দুগুলি DA বরাবর ফিরে আসতে থাকে। দোলন দুটির মধ্যে $\pi/2$ **দশান্তর** থাকলে, অনুরূপভাবে লেখচিত্র (10.10*b*) আঁকা যায়।

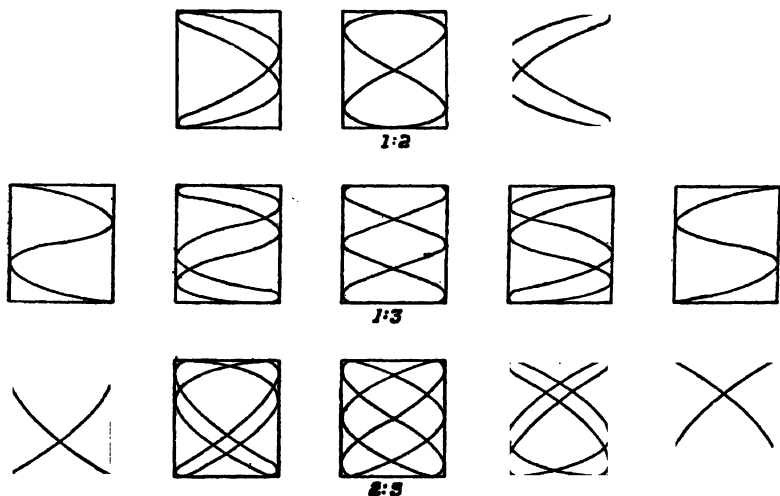
(২) **কম্পাংক অসমান কিন্তু ক্ষুদ্র অখণ্ড সংখ্যার অনুপাতে** হলে, পরিধিগুলিকে সম-অবসর ভিত্তিতে ভাগ করতে হবে ; অংকন আগের মতোই।

(*a*) সমদশা।

(*b*) পাদান্তর দশা।

চিত্র 10.10—সমকম্পাংক, 2 : 1 সরণ-বিস্তারে দুই সরল দোলনের লব্ধি-সঞ্চারপথ
(লিসাজু-চিত্র)

(*a*) সমদশা

(*b*) পাদান্তর দশা

চিত্র 10.11— 2 : 1 কম্পাংক অনুপাতে আগের দুই সরল দোলনের লব্ধি-সঞ্চারপথ
(লিসাজু-চিত্র)

10.11(a) চিত্রে দোলন দুটি সমদশা কিন্তু কম্পাংক-অনুপাত 2 : 1; 10.11(b) চিত্রে সেই দোলন দুটির মধ্যে $\pi/2$ দশান্তর। প্রথমটিতে লেখচিত্র বদ্ধমুখ, দ্বিতীয়তে খোলা-মুখ (১০-৬.৮খ সমীকরণ); 10.12 চিত্রে লম্বি-সরণে কম্পাংক-অনুপাত 4 : 3, কিন্তু দু'ক্ষেত্রে আদিদশা ভিন্ন ভিন্ন।

চিত্র 10.12—কম্পাংক-অনুপাত 4 : 3 (লিসাজু-চিত্র)

(৩) **কম্পাংক-অনুপাত দুই ক্ষুদ্র অখণ্ড সংখ্যার অনুপাতের কাছাকাছি** কিন্তু ঠিক সমান না হলে, দোলনপথ কেবলই বদলাতে থাকে প্রথমে এক দিকে, পরে উল্টো দিকে। 10.13 চিত্রে, প্রতি লাইনের মাঝের

চিত্র 10.13—আরও লিসাজু-চিত্রাবলী

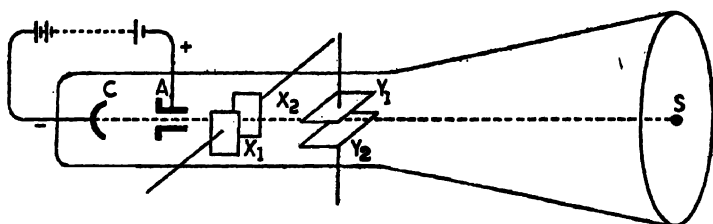
ছবিটিতে অখণ্ড সংখ্যার ঠিক অনুপাতে যেরকম লেখ হবে, তাই দেখানো হয়েছে। কম্পাংক-অনুপাত সামান্য আলাদা হলে, লেখগুলির আকারে ক্রমিক পরিবর্তন

প্রতি লাইনে পাশাপাশি দেখানো হয়েছে। এক পূর্ণ চক্রে পরিবর্তন, যেকোন প্রান্ত থেকে সুরু ক'রে অন্য প্রান্ত পর্যন্ত গিয়ে আবার সেখানেই ফিরে আসে। 10.9 চিত্রেও আমরা দেখেছিলাম যে, সামান্য কম্পাংকভেদে দোলনপথের এই-রকম পূর্ণচক্র পুনরাবৃত্ত হয়। 10.13 চিত্রে কম্পাংক-অনুপাত 1 : 2, 1 : 3 এবং 2 : 3 অনুপাতের কাছাকাছি হলে, দোলনপথের কিরকম আবর্তী রূপান্তর ঘটে তা দেখানো হয়েছে।

১০-৯. লিসাজু-চিত্র রচনা ও প্রদর্শনীর ব্যবস্থা :

স্বয়ংক্রিয়ভাবে লিসাজু-চিত্র অংকিত হওয়ার নানা ব্যবস্থা আছে। তাদের বৈদ্যুতিক, আলোক বা যান্ত্রিক প্রভৃতি শিরোনামায় বর্ণনা করা যায়।

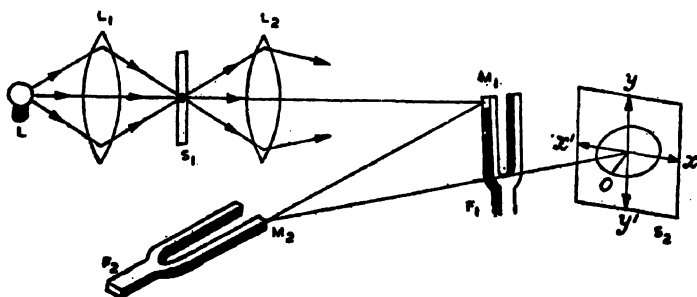
ক. বৈদ্যুতিক ব্যবস্থা (Cathode Ray Oscillograph, C. R. O.) : ব্যবস্থাটি আধুনিকতম এবং সহজে অনেকজনকে লিসাজু-চিত্র দেখাবার সুন্দর পন্থা। এতে অতি দ্রুতগামী ইলেকট্রন-কিরণের ওপর পরস্পর সমকোণে পরিবর্তী বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র প্রয়োগ ক'রে অতি উচ্চ কম্পাংকের (এমনকি মেগাহার্ৎজ ক্রমের) স্পন্দনের বেলাতেও লিসাজু-চিত্র প্রদর্শন করা সম্ভব।

ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখ (চিত্র 10.14) একটি দীর্ঘ বায়ুশূন্য কাচ-নল। তার এক প্রান্তে একটি গরম পাত C থেকে তাপীয় ইলেকট্রনের উৎপত্তি হয়; A একটি ধাতুর তৈরী বেঁটে, ফাঁপা নল। A এবং C-এর মধ্যে স্থির কিন্তু উচ্চ

চিত্র 10.14—ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখ

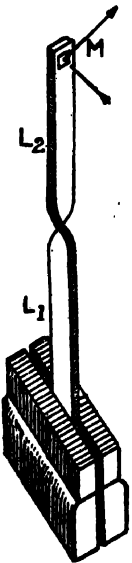
বিভবভেদ প্রয়োগ করলে A থেকে উদ্ভূত ইলেকট্রন-রশ্মি ত্বরান্বিত হবে। দু'জোড়া বিক্ষেপী পাতের (X_1X_2 এবং Y_1Y_2) মধ্যে দিয়ে এই কিরণ যায়। তারা যথাক্রমে এক এক জোড়া উল্লম্ব এবং অনুভূমিক সমান্তরাল-পাত ধারক। যন্ত্রের অপর প্রান্তে S একটি প্রতিপ্রভ (fluorescent) পর্দা।

CA-র মধ্যে উচ্চ বিভবভেদে ত্বরিত ইলেকট্রন-রশ্মি S পর্দার কেন্দ্রে উজ্জ্বল আলোকবিন্দু সৃষ্টি করবে। যদি X_1X_2-র মধ্যে প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ প্রয়োগ করা যায়, তাহলে দুই পাতের মধ্যে অনুভূমিক প্রত্যাবর্তী ক্ষেত্র সক্রিয় হবে এবং S-এর ওপর একটি অনুভূমিক রেখা ফুটে উঠবে। যদি শুধু Y_1Y_2-র মধ্যে প্রত্যাবর্তী ক্ষেত্র প্রতিষ্ঠিত হয়, তাহলে পর্দার ওপর উল্লম্ব রেখা ফুটবে। রেখা দুটির দৈর্ঘ্য, প্রত্যাবর্তী দুই বিভবভেদের চরম মানের আনুপাতিক। দুটি প্রত্যাবর্তী বিভব-বৈষম্য একযোগে দু'জোড়া পাতে প্রযুক্ত হলে তাদের উপরিপাতনে যথাযথ লিসাজু-চিত্র লিখিত হবে। তাদের কম্পাংক-অনুপাত দুই অখণ্ড সংখ্যার অনুপাতে হলে, লিখিত চিত্র স্থির থাকবে; প্রায় সমান হলে, ধীরে ধীরে আবর্তিত হতে থাকবে।

এখন যদি X_1X_2 পাতের মধ্যে সরল দোলনী বিভবভেদ এবং Y_1Y_2 পাতের মধ্যে সমহারে হ্রাসমান একমুখী (unidirectional) বিভববৈষম্য প্রয়োগ করা যায়, তাহলে আলোকবিন্দু পর্দার ওপর (10.16A চিত্র) **সরল দোলনের কাল-সরণ লেখ** আঁকতে থাকে। কাল-ভূমি (time-base) বর্তনী থেকে একমুখী হ্রাসমান বিভবভেদ সরবরাহ করা হয়। এই বর্তনীটি যন্ত্রের আবশ্যিক অঙ্গ।

খ. আলোক-লিখ : সমকোণে স্পন্দমান দুই সুরশলাকার কম্পাংক-অনুপাত নির্ভুলভাবে নির্ণয় করতে লিসাজু-ই প্রথম প্রতিফলিত আলোকরশ্মিকে লিখক (tracer) হিসাবে ব্যবহার করেন। 10.15 চিত্রে F_1 ও F_2 খুব

চিত্র 10.15—লিসাজু-চিত্রের আলোক-লিখ

কাছাকাছি কম্পাংকের দুই সুরশলাকা, তাদের বাহুতে M_1 ও M_2 দুই ছোট্ট সমতল আয়না; তাদের মধ্যে F_1 খাড়া ভাবে এবং F_2 অনুভূমিক ভাবে আছে। তাদের স্পন্দন যথাক্রমে অনুভূমিক ও খাড়া তলে হয়। জোরালো উৎস

(L) থেকে আলো S_1 পর্দার ছোট ফুটোর মধ্যে দিয়ে অবার্ণ (achromatic) লেন্‌সের (L_2) ওপর পড়ে। তার ফোকাস-বিন্দু, অনেক দূরে আর-এক পর্দার (S_2) ওপর O বিন্দুতে। L_2 থেকে O-তে যাওয়ার পথে আলোক-কিরণ M_1 ও M_2 দর্পণে ক্রমান্বয়ে প্রতিফলিত হয়। কেবলমাত্র F_1 যদি কাঁপে, তাহলে S_2 পর্দার ওপর আলোকরশ্মি xox' রেখা টানবে। শুধু F_2 কাঁপলে, yoy' রেখা অংকিত হবে। দুটি একযোগে কাঁপলে, আলোকরশ্মি লিসাজু-চিত্র আঁকবে। অংকিত চিত্র স্থায়ী করতে হলে সুরশলাকার স্পন্দন-বিস্তার অক্ষুণ্ণ রাখতে হবে; সেজন্যে তাদের বৈদ্যুতিক উদ্দীপন দরকার। আলোকরশ্মির ক্রিয়াপদ্ধতি CRO-র ইলেকট্রন-কিরণের অনুরূপ। চিত্ররূপ স্থায়ী রাখতে হলে পর্দার বদলে আলোকসচেতন ফিল্‌ম্ ব্যবহার করা যায়।

চিত্র 10.16
ক্যালিডোফোন

গ. ক্যালিডোফোন ঃ হুইটস্টোন-উদ্‌ভাবিত এই ব্যবস্থাটি আলোকরশ্মি-লিখন পদ্ধতির খুব সহজ উদাহরণ। এখানে লোহার লম্বা, পাতলা, সরু একটা পাতকে (10.16 চিত্র) মাঝামাঝি মোচড় দিয়ে পরস্পরের সমকোণে (L_1, L_2) দুই অংশ তৈরী করা হয়। L_2-র ওপরদিকে ছোট্ট এক আয়নার মতো পালিশ-করা অংশ (M) থাকে। L_1-কে শক্ত ক'রে ভাইস্-যন্ত্রে আটকে L_2-র শীর্ষকে বিচলিত করলে, পাতটির L_1, L_2-র দৈর্ঘ্যের আনুপাতিক কম্পাংকে যৌগ স্পন্দন হয় এবং M থেকে প্রতিফলিত রশ্মি পর্দার ওপর যথোপযুক্ত লিসাজু-লেখ এঁকে যায়।

এরা ছাড়া ব্ল্যাকবার্ন-উদ্ভাবিত দোলক এবং টিজ্‌লে-উদ্ভাবিত সমঞ্জস-লিখ (Harmonograph) ব্যবহার ক'রেও যান্ত্রিকভাবে খুব সহজেই লিসাজু-চিত্র আঁকা যায়। হেল্‌ম্‌-হোল্‌ৎজের উদ্ভাবিত স্পন্দনশীল অণুবীক্ষণ-যন্ত্র দিয়েও (§ 12-11) লিসাজু-চিত্রের ক্রমবিবর্তন দেখানো যায়।

লিসাজু-চিত্রের ব্যবহারিক প্রয়োগ ঃ (১) দুই স্পন্দনের পর্যায়কাল-অনুপাত নির্ণয় ঃ যেকোন লিসাজু-লেখ ছেদ ক'রে একটি অনুভূমিক আর একটি খাড়া রেখা টানলে, তারা যদি p এবং q বার, লেখটিকে ছেদ করে তবে দুই আঙ্গিক স্পন্দনের পর্যায়কালের অনুপাত $p : q$ এবং কম্পাংকের অনুপাত তাই $q : p$ হবে। লেখটিকে ঘিরে যে আয়তক্ষেত্র টানা যায়, তার দুই বাহুর অনুপাত দুই স্পন্দনবিস্তারের অনুপাত।

(২) সুরশলাকার কম্পাংক নির্ণয় : এজন্যে পরীক্ষাধীন সুর-শলাকা এবং জানা কম্পাংকের অপর একটি সুরশলাকা চাই এবং তাদের স্পন্দন পরস্পর সমকোণে হতে হবে এবং দশাসম্পর্ক অক্ষুণ্ন থাকতে হবে। অজানা সুরশলাকার কম্পাংক, জানা কম্পাংকের খুব কাছাকাছি কিম্বা তার অষ্টকের খুব কাছাকাছি হতে হবে।

ধরা যাক, তাদের কম্পাংক যথাক্রমে q এবং $(q+b)$; b ক্ষুদ্র অখণ্ড রাশি। তাদের যৌথ কম্পনের সঞ্চারপথ প্রায় এক উপবৃত্তের মতো হবে। কিন্তু দ্রুততর কম্পন অপরটিকে পেছনে ফেলে ক্রমশই এগোতে থাকবে, লিখকের সঞ্চারপথ বদলাতে থাকবে এবং যখন দ্রুততর কম্পনের সংখ্যা পুরো 1 এগিয়ে যাবে তখন স্পন্দন আবার সমদশায় আসবে এবং প্রাথমিক কক্ষপথ পুনর্লিখিত হবে। এই পুনরাবৃত্তির মধ্যে কালান্তর t হলে, $bt=1$; কাজেই তীক্ষ্ণতর সুরশলাকার কম্পাংক $(q+1/t)$ হবে [10.15 চিত্র]

আবার অজানা সুরশলাকার কম্পাংক $2q \pm b$ হলে, লিসাজু-চিত্র 8 চিহ্ন থেকে অধিবৃত্তের আকারে (10.13 চিত্রে প্রথম সারি) যায়, আবার ফিরে আসে। ঐ সারিতে অঙ্কিত পুরো পরিবর্তন হতে t সময় লাগলে, আগের মতোই $b=1/t$ হবে। আর তারা q এবং $2q$ হলে, লেখচিত্র 8 চিহ্নেই স্থির থাকবে।

যদি তাদের কম্পাংকের অনুপাত দুই ক্ষুদ্র অখণ্ড সংখ্যার অনুপাত $p : q$ হয়, তাহলে লিসাজু-চিত্র p/q অনুপাতের স্থির সঞ্চারপথ হবে। খাড়া ও অনুভূমিক রেখার ছেদবিন্দু গুনে এই অনুপাত বার করা যায়। অনুপাত যদি $p : (a+b)$ হয়, তাহলে $p : q$ অনুপাতের সঞ্চারপথের আকারের একবার পুনরাবৃত্তির সময় থেকে b বার করা যাবে।

উদাহরণ : 200 হাৎ'জ্ এবং কাছাকাছি কম্পাংকের দুটি সুরশলাকার চিত্রিত লিসাজু-লেখ 15 সেকেণ্ডে একবার আবৃত্ত হয়। অজানা সুরশলাকার বাহুতে এক ফোঁটা মোম ফেললে এই পরিবর্তন 10 সেকেণ্ডে একবার হয়। অজানা কম্পাংক কত ?

সমাধান : মোম দেওয়ার আগে অজানা কম্পাংকের সুরশলাকার দোলন 15 সেকেণ্ডে একবার এগিয়ে যায় বা পেছিয়ে যায়। তাহলে

$$q=p \pm 1/t=200 \pm 1/15=200.066 \text{ বা } 199.934$$

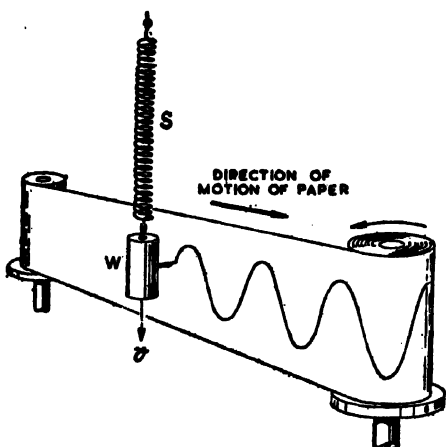
মোম দেওয়ার ফলে অজানা কম্পাংক কমে যাবে। যেহেতু লিসাজু-চিত্রের আবৃত্তির সময় কমে গেল, সেইহেতু বুঝতে হবে p এবং q-এর মধ্যে

কম্পাংকভেদ বেড়ে গেছে। সুতরাং গোড়ায় অজানা কম্পাংক কমই ছিল, অর্থাৎ তার মান 199.934 ছিল।

স্বরকম্প গুণে ঠিক এইভাবেই সুরশলাকার অজ্ঞাত কম্পাংক বার করা হয়।

ক্যোনিগ এই পন্থাতেই উষ্ণতার সঙ্গে সুরশলাকার কম্পাংক কতখানি বদলায়, তা বার করছেন। তারের বা সুরশলাকার কম্পাংক নির্ণয়ে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজের স্পন্দক-অণুবীক্ষণের কার্যপ্রণালীও (§ 12-11) এই নীতির ওপরে ভিত্তি ক'রেই উদ্‌ভাবিত হয়েছে।

১০-১০. সরল দোলন এবং রৈখিক গতির সংশ্লেষ:

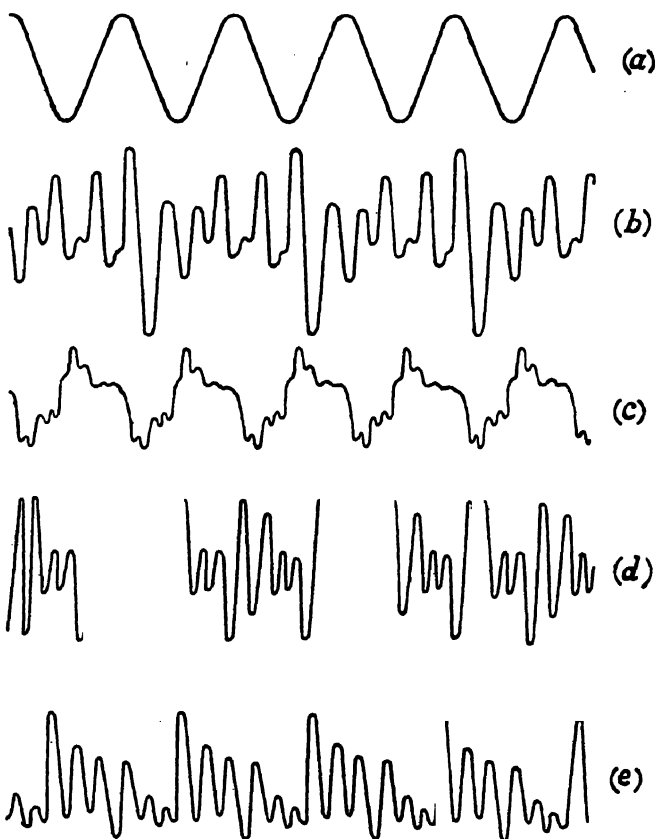
নানারকম সরল দোলনের সংশ্লেষে উৎপন্ন সঞ্চারপথের নমুনা আমরা দেখলাম। সরল দোলনের সমকোণে রৈখিক গতি সংশ্লিষ্ট ক'রে কি হয়, এবারে তাই দেখব।

চিত্র 10.16A—সরল দোলন ও রৈখিক গতির সংশ্লেষ-লেখ

10.16A চিত্রে খুব হালকা স্প্রিং (S) থেকে বিলম্বিত একটি ভারী স্তম্ভক W ওপর-নিচে স্পন্দিত হচ্ছে—তার স্পন্দন সরল দোলন। তার গায়ে একটি সূচী-লেখনী লাগানো আছে। লেখনীর শীর্ষ হাল্‌কাভাবে ছুঁয়ে একখানা কাগজ বাঁ থেকে ডাইনে যাচ্ছে। আমরা দেখছি, কাগজের গায়ে একটি সাইন-রেখা উৎপন্ন হচ্ছে—সরল দোলন এবং তার সমকোণে রৈখিক গতির সংশ্লেষ-ফল—5.6 চিত্রে অংকিত সরল দোলকের কাল-সরণ রেখা এবং 1.6 চিত্রে অংকিত সরল দোলনের লেখচিত্রের সঙ্গে অভিন্ন।

16.11 চিত্রে এই সংশ্লেষ ব্যবহার ক'রে সুরশলাকার কম্পাংক সরাসরি বার করার পন্থা দেখানো হয়েছে। ডুহামেল-এর উদ্ভাবিত স্পন্দন-ছক (Vibroscope) যন্ত্রে, এক বাহুতে হাল্‌কা লেখনীযুক্ত সুরশলাকার কম্পন একটি ভুষো-মাখানো এবং ঘূর্ণায়মান স্তম্ভকের গায়ে চিহ্নিত হয়। সে চিত্রও

10.16A চিত্রের লেখের মতোই হয় ; এক সেকেণ্ডে অঙ্কিত ঢেউয়ের সংখ্যা গুণে সুরশলাকাটির কম্পাংক বার করা যায়।

১০-১১. জটিল স্পন্দনের বিশ্লেষণ : ফুরিয়ার উপপাদ্য :

এপর্যন্ত আমরা নানা সরল দোলনের সংশ্লেষ করেছি ; দেখেছি যে তাতে অনেকসময়েই দোলন সরল থাকে না, জটিল পর্যাবৃত্ত স্পন্দনে পরিণত হয় ; স্বরকম্প ও নানা লিসাজু-চিত্রগুলিই তার প্রমাণ। বাস্তব স্বনক-সমূহের মধ্যে কেবলমাত্র বিদ্যুৎচালিত স্বল্পবিস্তার সুরশলাকার স্পন্দনই

চিত্র 10.17—বিভিন্ন বাদ্যযন্ত্রের দোলন-লিখ

সরল দোলন। আর সব স্বনকের স্পন্দনই জটিল। সরল দোলনের কাল-সরণ বা দেশ-সরণ রেখা সাইন-রেখা (চিত্র 1.5, 2.1, 5.5, 5.6) হয়,

জটিল স্পন্দনে সেই রেখা পর্যাবৃত্ত হলেও সাইন আকারের হয় না। 10.17(a) চিত্রে প্রথম রেখাটি একটি সুরশলাকার কাল-সরণ রেখা, অন্যগুলি পরিচিত নানা বাদ্যযন্ত্রের ; তাদের মধ্যে তফাৎ সুস্পষ্ট। বেতারসংকেত-প্রেরণে নানারকম সুবিধার জন্যে বর্গ, ত্রিভুজ বা করাত-দন্তুর (saw-tooth) আকৃতির নিয়মিত জ্যামিতিক স্পন্দনও উৎপন্ন করা হয়—তারা কিন্তু বাদ্যযন্ত্রের কাল-সরণ রেখাগুলির তুলনায় কম জটিল। আমরা এইজাতীয় স্পন্দনগুলিরই বিশ্লেষণ ক'রবো। আমরা এপর্যন্ত সংশ্লেষ করেছি, এই প্রক্রিয়া তার বিপরীত।

আমরা আগেই ১-৩ অনুচ্ছেদে বলেছি, ফরাসী বিজ্ঞানী **ফুরিয়ার** দেখিয়েছেন যে, স্পন্দন যত জটিলই হোক না কেন, যথাযথ বিস্তার এবং কম্পাংকের বহু সাইন-রেখার উপরিপাতন ঘটিয়ে, তার আসন্ন রূপ পাওয়া সম্ভব—অর্থাৎ **জটিল স্পন্দনমাত্রেই অনেকগুলি সরল দোলনের সমষ্টি**। বিজ্ঞানে এবং প্রকৃতিতে অসংখ্য পর্যাবৃত্ত ঘটনার স্বরূপ-বিশ্লেষণে, জটিল স্পন্দনের এই ধর্মের গুরুত্ব যথেষ্ট ; যান্ত্রিক, বৈদ্যুতিক এবং ইলেকট্রনীয় প্রযুক্তিবিদ্যায়, আবহপূর্বাভাষে, জোয়ার-ভাঁটার আচরণে, সৌরকলঙ্কের প্রভাব-বিচারে, ভূকম্পতত্ত্বে, সৌরতাপে ভূত্বকের আহ্নিক এবং বার্ষিক তাপন-বিচারে, কণ্ঠ বা বাদ্যযন্ত্রের সুর বা কোন দীপকের বর্ণালী-বিশ্লেষণে বিজ্ঞানীরা যে অসংখ্য জটিল স্পন্দনরেখা পান—তাদের স্বরূপ-বিচারে এই উপপাদ্যই তাঁদের প্রধান হাতিয়ার। মানুষের কান এক প্রকৃতিদত্ত ফুরিয়ার-বিশ্লেষক।

ফুরিয়ার উপপাদ্যের প্রতিরূপ :* **যেকোন ঐকমান পর্যাবৃত্ত অপেক্ষক যদি নিরন্তর হয় বা তাতে যদি কয়েকটি মাত্র অসন্ততি থাকে, তাহলে তাকে তার কম্পাংকের গুণিতক-যুক্ত সরল সমঞ্জস পদশ্রেণীর সমাহার হিসাবে প্রকাশ করা যায়।**

আমাদের আলোচ্য বিষয়বস্তুর মধ্যে দু'রকমের পর্যাবৃত্ত রাশি—কালসাপেক্ষ রাশি হচ্ছে স্পন্দন, আর তরঙ্গ হচ্ছে কাল ও দেশ দুইই সাপেক্ষ। দু'রকম রাশিরই ফুরিয়ার-বিশ্লেষণ ক'রবো আমরা।

কালসাপেক্ষ পর্যাবৃত্ত অপেক্ষক তথা স্পন্দনের বেলায় উপপাদ্যটিকে অংকের ভাষায় এইভাবে লেখা যায় :

---

* ঐকমান (single-valued), নিরন্তর (continuous), অসন্তত (discontinuous), পদশ্রেণীর (series) সমাহার (summation)।

$$y=f(t)=\tfrac{1}{2}a_0+a_1\cos\omega t+a_2\cos 2\omega t+\cdots$$
$$+b_1\sin\omega t+b_2\sin 2\omega t+b_3\sin 3\omega t+\cdots$$
$$=\tfrac{1}{2}a_0+\sum^{n=\infty}(a_n\cos n\omega t+b_n\sin n\omega t) \quad (১০\text{-}১১.১)$$

এই ফুরিয়ার পদশ্রেণীকে শুধু সাইন বা কোসাইন পদ-সমাহার হিসেবেও লেখা যায়। যেমন, $A_n=(a_n^2+b_n^2)^{1/2}$ এবং $\tan\phi=-b_n/a_n$ ব'লে

$$y=\tfrac{1}{2}a_0+A_1\cos(\omega t+\phi_1)+A_2\cos(\omega t+\phi_2)+\cdots \quad (১০\text{-}১১.২)$$

আকারেও ফুরিয়ার উপপাদ্য লেখা চলে।

সহগগুলির মান নির্ণয়ঃ প্রথম সমীকরণে $a_0, a_1, a_2, \cdots b_1, b_2, \cdots$ প্রভৃতি, ধ্রুবমান সহগ। এদের মান নির্ণয় করতে আমরা নীচের সমাকলন ফলগুলি ব্যবহার ক'রবো—

$$\int_0^{2\pi}\sin\theta.d\theta=0;\ \int_0^{2\pi}\sin^2\theta.d\theta=\pi;\ \int_0^{2\pi}\cos^2\theta.d\theta=\pi;$$

এবং যখন $m\neq n$ তখন

$$\int_0^{2\pi}\sin m\theta.\cos n\theta.d\theta=0;\ \int_0^{2\pi}\sin m\theta.\sin n\theta.d\theta=0;$$
$$\int_0\cos m\theta.\cos n\theta.d\theta=0$$

(ক) **প্রথম সহগ**—a_0-র মান নির্ণয় করতে ১০-১১.১ সমীকরণের দু'দিক dt দিয়ে গুণ ক'রে $t=0$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত সমাকলন করতে হবে ; এখানে $T(=2\pi/\omega)$, নিম্নতম তথা মূল কম্পাংকে স্পন্দনের পর্যায়কাল। এই সমাকলন করলে সব সাইন এবং কোসাইন রাশিগুলি প্রথম সমাকল অনুযায়ী শূন্য হয়ে যাবে। তাহলে থাকছে

$$\int_0^T y.dt=\tfrac{1}{2}a_0\cdot T \quad \text{বা} \quad a_0=\frac{2}{T}\int_0^T y.dt \quad (১০\text{-}১১.৩)$$

অর্থাৎ প্রথম ধ্রুবকটি, নির্ণেয় অপেক্ষকের গড় মানের দ্বিগুণ।

(খ) **কোসাইন শ্রেণীর যেকোন সহগের** (a_n) মান বার করতে সমীকরণের দু'ধার $\cos m\omega t.dt$ দিয়ে গুণ ক'রে $t=T$ পর্যন্ত সমাকলন

করতে হবে। তাহলে সমাকলন-তালিকার চতুর্থ ও ষষ্ঠ ফল অনুসারে শুধু $m=n$ রাশিটি ছাড়া সব-ক'টি রাশিই শূন্য হবে। তখন

$$\int_0^T y\cos n\omega t.dt=\int_0^T a_n\cos^2 n\omega t.dt$$
$$=\frac{a_n}{2}\int_0^T (1+\cos 2n\omega t)\,dt$$
$$=\tfrac{1}{2}a_n.T$$

$$\therefore\quad a_n=\frac{2}{T}\int_0^T y\cos n\omega t.dt \qquad (১০\text{-}১১.৪)$$

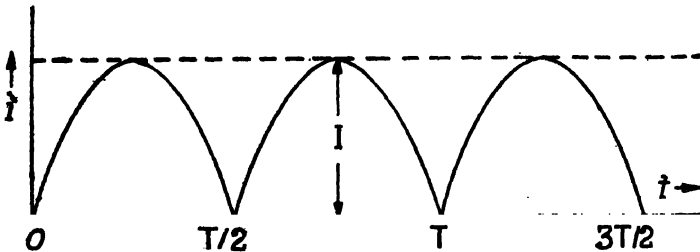
ওপরের তালিকার তৃতীয় সমাকলন ফল থেকেও দেখা যায় যে, সরাসরি সমাকলন ফল $T/2$ হচ্ছে।

(গ) **সাইন শ্রেণীর যেকোন সহগের** (b_n) মান নির্ণয় করতে $\sin n\omega t.dt$ দিয়ে সমীকরণের দু'পক্ষ গুণ ক'রে $t=0$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত সমাকলন করতে হবে। ফলটা কোসাইন সহগের মতোই দাঁড়াবে। সমাকলন-তালিকার পঞ্চম ও দ্বিতীয় ফল প্রয়োগে নির্ণেয় মান মিলবে

$$b_n=\frac{2}{T}\int_0^T y\sin n\omega t.dt \qquad (১০\text{-}১১.৫)$$

১০-১২. স্পন্দনের ফুরিয়ার বিশ্লেষণ পদ্ধতি:

(১) পূর্ণশোধিত প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা (Fully Rectified A. C.):

এক্ষেত্রে পর্যাবৃত্ত অপেক্ষকের কাল-সরণ-রেখা 10.18 চিত্রে দেখানো হয়েছে। তার সমীকরণ হচ্ছে

চিত্র 10.18—পূর্ণশোধিত বিদ্যুৎ-ধারা

$t=0$ থেকে $t=T/2$ পর্যন্ত $\quad i=f(t)=I\sin\omega t$

আর $t=T/2$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $\quad i=f(t)=-I\sin\omega t$

সমাধান : এক্ষেত্রে ফুরিয়ার পদশ্রেণী ধরা যাক

$$i = y = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \qquad (১০\text{-}১২.১)$$

তাহলে ১০-১১.৩ অনুযায়ী

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T y.dt = \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} I \sin \omega t.dt + \int_{T/2}^{T} -I \sin \omega t.dt\right]$$

$$= \frac{2I}{T}\left[-\left(\frac{\cos \omega t}{\omega}\right)_0^{T/2} + \left(\frac{\cos \omega t}{\omega}\right)_{T/2}^{T}\right] = \frac{2I}{\omega T}.4$$

$$\therefore \quad \frac{a_0}{2} = \frac{4I}{\omega T} = \frac{4I}{2\pi} = \frac{2I}{\pi} \qquad (১০\text{-}১২.১ক)$$

তারপর ১০-১১.৪ সমীকরণ থেকে

$$a_n = \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} y \cos n\omega t.dt + \int_{T/2}^{T} y \cos n\omega t.dt\right]$$

$$= \frac{4}{T}\int_0^{T/2} y \cos n\omega t.\, dt \quad \left[\text{কারণ চিত্র থেকে দেখছি, } y\text{-এর মান } T/2\text{-এর আগে এবং পরে সমদূরত্বে সমান}\right]$$

$$= \frac{4}{T}\int_0^{T/2} I \sin \omega t.\cos n\omega t.dt$$

$$= \frac{4I}{T}\left[\frac{1}{2}\left\{\int_0^{T/2} \sin (1+n)\, \omega t.dt + \int_0^{T/2} \sin(1-n)\, \omega t.dt\right\}\right]$$

$$= -\frac{2I}{T\omega}\left[\frac{\cos (1+n)\, \omega T/2}{(1+n)} - \frac{1}{1+n} + \frac{\cos (1-n)\, \omega T/2}{1-n} - \frac{1}{1-n}\right]$$

$$= -\frac{2I}{T\omega}\left[\frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\pi}{n-1} + \frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1}\right]$$

$$= -\frac{I}{\pi}\left[\frac{\cos(n+1)\pi - 1}{n+1} + \frac{1-\cos(n-1)\pi}{n-1}\right]$$

(১০-১২.১খ)

এখন $n=1, 2, 3$ ইত্যাদি বসালে পাব

$$a_1=0,\ a_2 = -\frac{4I}{3\pi},\ a_3=0,\ a_4=-\frac{4I}{15\pi},\ a_5=0,$$

তারপর ১০-১১.৫ থেকে

$$b_n = \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} y \sin n\omega t.dt + \int_{T/2}^{T} y \sin n\omega t.dt\right]$$

$$= \frac{4}{T}\int_0^{T/2} I \sin \omega t.\sin n\omega t.dt$$

$$= \frac{4I}{T} \times \frac{1}{2}\left[\int_0^{T/2} \cos(1-n)\,\omega t.dt - \int_0^{T/2} \cos(1+n)\,\omega t.dt\right]$$

$$= \frac{2I}{\omega T}\left[\frac{\sin(1-n)\,\omega T/2}{1-n} - \frac{\sin(1+n)\,\omega T/2}{1+n}\right]$$

$$= \frac{I}{\pi}\left[\frac{\sin(n-1)\pi}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\pi}{n+1}\right] = 0 \quad (\text{১০-১২.১গ})$$

অর্থাৎ b-পদগুলি সবাই শূন্যমান। অতএব সমাধানে কেবলমাত্র কোসাইন পদশ্রেণী থাকছে।

$$\therefore \quad i = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty} a_n \cos n\omega t$$

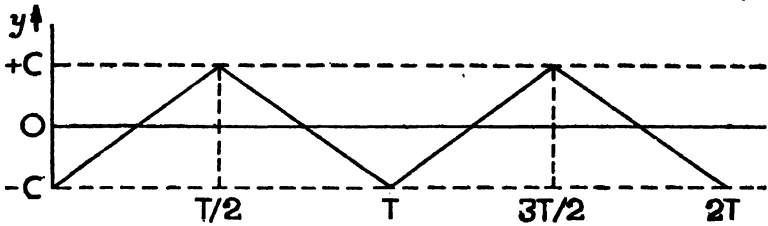
$$\frac{2I}{\pi} - \frac{4I}{\pi}\left(\frac{\cos 2\omega t}{3} + \frac{\cos 4\omega t}{15} + \frac{\cos 6\omega t}{35} + \cdots\right.$$

(১০-১২.২)

তাহলে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারাকে পূর্ণ শোধন করলে একটি দিষ্ট (direct) উপাংশ ($2I/\pi$), আর দ্রুতক্ষয়িষ্ণু মূল কম্পাংকের কয়েকটি যুগ্মসমমেল (even harmonics) প্রত্যাবর্তী উপাংশ পাওয়া যাবে।

প্রশ্ন : প্রত্যাবর্তী বিভববৈষম্য $E_0 \sin \omega t$ প্রয়োগে একটি পূর্ণশোধক বর্তনীতে রোধক R-এর মধ্যে প্রবাহিত বিদ্যুৎ-ধারার পদশ্রেণী নির্ণয় কর।

উ :
$$i = 2E_0/\pi R - \frac{4E_0}{\pi R}\left(\frac{1}{3}\cos 2\omega t + \frac{1}{15}\cos 4\omega t + \frac{1}{35}\cos 6\omega t + \cdots\right)$$

(২) ত্রিভুজাকৃতি-তরঙ্গ (Triangular wave) [চিত্র 10.19] : এখানে কাল-সরণ-লেখচিত্রের সমীকরণ

চিত্র 10.19—ত্রিভুজ-তরঙ্গ

$t=0$ থেকে $t=T/2$ পর্যন্ত $y=2Ct/T$

$t=T/2$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $y=2C(1-t/T)$

সমাধান : এখানে ফুরিয়ার-প্রসারণ-শ্রেণী ধরা যাক,

$$y = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{n=\infty}(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \qquad (১০\text{-}১২.৩)$$

তাহলে ১০-১১.৩ অনুযায়ী

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T}\int_0^T y.dt$$
$$= \frac{1}{T}\left[\int_0^{T/2} \frac{2C}{T} t.dt + \int_{T/2}^{T} 2C(1-t/T)\,dt\right]$$
$$= \frac{2C}{T}\left[\frac{1}{T}\left(\frac{t^2}{2}\right)_0^{T/2} + \left(t - \frac{t^2}{2T}\right)_{T/2}^{T}\right]$$
$$= \frac{2C}{T}\left[\frac{T}{8} + \frac{1}{2T}\left(2T^2 - T^2 - T^2 + \frac{T^2}{4}\right)\right]$$
$$= \frac{2C}{T}\cdot\frac{T}{4} = C/2 \qquad (১০\text{-}১২.৩ক)$$

তারপর $a_n = \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} \frac{2C}{T} t \cos n\omega t.dt\right.$

$$\left. + \int_{T/2}^{T} 2C\left(1-\frac{t}{T}\right)\cos n\omega t.dt\right]$$

$$= \frac{4C}{T^2}\left[\int_0^{T/2} t \cos n\omega t.dt\right.$$

$$\left. + \int_{T/2}^{T} (T-t) \cos n\omega t.dt\right]$$

দুই সমাকল্যকে অংশ ধ'রে ধ'রে সমাকলন করলে (integrating by parts), পাব

$$a_n = \frac{4C}{T^2}\cdot\frac{2}{n^2\omega^2}\left[(-1)^n - 1\right] \qquad (১০\text{-}১২.৩খ)$$

দেখা যাচ্ছে, n যুগ্মসংখ্যা হলে, $a_n = 0$ হবে

আর অযুগ্ম হলে, $a_n = -4C/\pi^2 n^2$ হবে।

আবার, $b_n = \frac{2}{T}\int_0^T y \sin n\omega t.dt$

$$= \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} \frac{2Ct}{T} \sin n\omega t.dt\right.$$

$$\left. + \int_{T/2}^{T} (1-t/T)\, 2C \sin n\omega t.dt\right]$$

$$= \frac{4C}{T^2}\left[\int_0^{T/2} t \sin n\omega t.dt + \int_{T/2}^{T} (T-t) \sin n\omega t.dt\right]$$

আগের মতোই আংশিক সমাকলন করলে পাব কিন্তু, $b_n = 0$; অর্থাৎ প্রথম উদাহরণের মতোই এখানেও সাইন পদাবলী অনুপস্থিত। তাহলে n-কে অযুগ্ম ধরলে,

$$y = \frac{C}{2} - \frac{4C}{\pi^2}\left(\cos \omega t + \frac{\cos 3\omega t}{3^2} + \frac{\cos 5\omega t}{5^2} + \cdots\right)$$

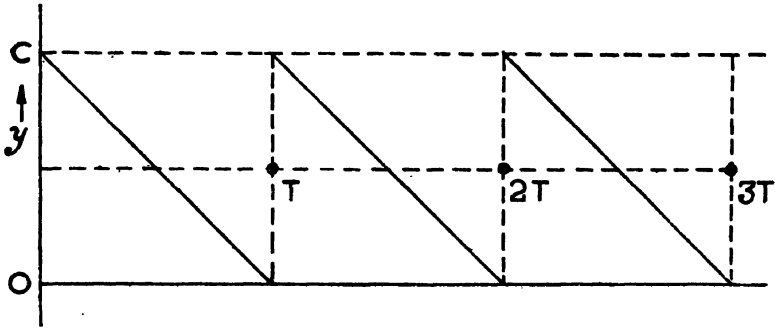
(১০-১২.৪)

এখানেও একটা দিষ্ট উপাংশ আর দ্রুততর ক্ষয়িষ্ণু কিন্তু অযুগ্ম সমমেল কোসাইন পদশ্রেণী পাওয়া যাচ্ছে। দ্রুততর ক্ষয়িষ্ণু অল্প কয়েকটি পদের সমাহার ঘটালেই বিশ্লেষ্য রেখার আসন্ন (approximate) রূপ মিলবে।

প্রশ্ন ঃ কাল-সরণ-রেখার সমীকরণ $t=0$ থেকে $t=T/2$ পর্যন্ত $y=(1-2t/T)K$ এবং $t=T/2$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $y=K\,(2t/T-1)$; ফুরিয়ার প্রসারণ বার কর।

সংকেত ঃ 10.19 চিত্রে y-অক্ষকে $T/2$ বিন্দুতে আন, T-তে $T/2$

উঃ $y=\dfrac{K}{2}+\dfrac{4K}{\pi^2}\left[\cos\omega t+\dfrac{\cos 3\omega t}{}+\cdots\right]$

(৩) করাত-দন্তুর তরঙ্গ (Saw-tooth wave) [চিত্র 10.20] **ঃ** এখানে কাল-সরণ-রেখার সমীকরণ $y=C\,(1-t/T)$, অর্থাৎ $t=0$ নিমেষে $y=C$ এবং $t=T$ মুহূর্তে $y=0$ হবে।

চিত্র 10.20(*a*)—করাত-দন্তুর স্পন্দন

সমাধান ঃ $$\frac{a_0}{2}=\frac{1}{T}\int_0^T y.\,dt=\frac{C}{T}\int_0^T(1-t/T)\,dt$$

$$=\frac{C}{T}\left[t-\frac{t^2}{2T}\right]_0^T=\frac{C}{T}\cdot\frac{T}{2}=\frac{C}{2}$$

(১০-১২.৫ক)

$$a_n=\frac{2}{T}\int_0^T y\cos n\omega t.\,dt=\frac{2C}{T}\int_0^T(1-t/T)\cos n\omega t.dt$$

$$=\frac{2C}{T}\left\{\left[(1-t/T)\frac{\sin n\omega t}{n\omega}\right]_0^T-\int_0^T\left(-\frac{1}{T}\right)\frac{\sin n\omega t}{n\omega}\cdot dt\right\}$$

$$=\frac{2C}{T^2}\left\{(T-t)\,\frac{\sin n\omega T}{n\omega}-\frac{(\cos n\omega t)^T{}_0}{n^2\omega^2}\right.$$

$$=\frac{2C}{n\omega T^2}\left\{(T-t)\sin n.2\pi-\frac{(\cos n.\,2\pi-\cos 0)}{n\omega}\right\}$$

$$=0 \qquad (১০\text{-}১২.৫খ)$$

অর্থাৎ এক্ষেত্রে a_n তথা কোসাইন পদশ্রেণী অনুপস্থিত।

$$b_n=\frac{2C}{T}\int_0^T(1-t/T)\sin n\omega t.\,dt$$

$$=\frac{2C}{T}\left\{\left[(1-t/T)\cdot\frac{-\cos n\omega t}{n\omega}\right]_0^T-\int_0^T\left(-\frac{1}{T}\right)\frac{-\cos n\omega t}{n\omega}\cdot dt\right.$$

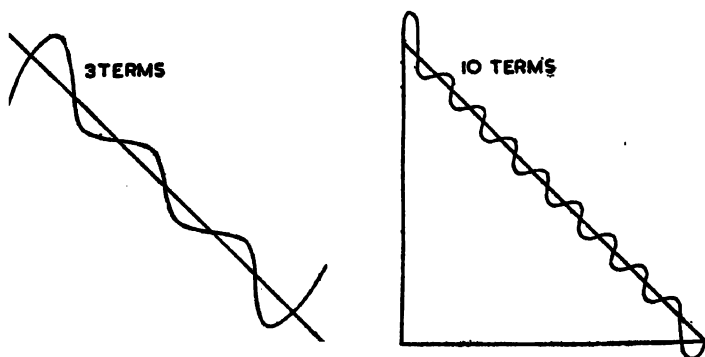
$$=\frac{2C}{T^2}\left\{-\left[(T-t)\frac{\cos n\omega t}{n\omega}\right]_0^T+\frac{(\sin n\omega t)^T{}_0}{n^2\omega^2}\right.$$

$$=\frac{2}{n\omega T^2}\left\{\left[(t-T)\cos n\omega t\right]_0^T-\frac{1}{n\omega}(\sin n\omega t)^T{}_0\right\}$$

$$=\frac{2C}{n.\,2\pi T}\left\{T-0\right\}=\frac{C}{n\pi} \qquad (১০\text{-}১২.৫গ)$$

$$\therefore\quad y=\frac{C}{2}+\frac{C}{\pi}\left[\sin\omega t+\frac{\sin 2\omega t}{2}+\frac{\sin 3\omega t}{3}+\cdots\right]$$

$$(১০\text{-}১২.৬)$$

10-20(b) চিত্রে যথাক্রমে প্রথম তিনটি ও প্রথম দশটি পদ জুড়লে সমাহার-লেখ কি-ভাবে বিশ্লেষ্য লেখের দিকে এগোয় তারই একটা ইঙ্গিত

চিত্র 10.20 (b)—করাত-দন্তর স্পন্দনের সংশ্লেষ-রেখা

দেওয়া হয়েছে। এখানে উচ্চতর পদগুলির বিস্তারে ক্ষয়হার কম, সে স্বাভাবিক সংখ্যাগুলির ব্যস্তানুপাতে বদলায় এবং সাইন সমমেলগুলি উপস্থিত। আগের উদাহরণে, ক্ষয়হার ছিল অযুগ্ম স্বাভাবিক সংখ্যার বর্গের ব্যস্তানুপাতিক, আর তাতে কেবল অযুগ্ম কোসাইন সমমেলগুলি উপস্থিত। এই উদাহরণে ক্ষয়হার কম ব'লে অনেক বেশীসংখ্যক পদ যোগ না করলে বিশ্লেষ্য রেখার আসন্ন রূপ মেলে না। পদসংখ্যা অসংখ্য হলেই তবে সমাহার-ফল আলোচ্য লেখের সঙ্গে অভিন্ন হবে।

প্রশ্ন : (*i*) প্রদত্ত করাত-দন্তুর তরঙ্গের সমীকরণ $y' = a\,(1-2t/T)$; ফুরিয়ার-প্রসারণের প্রথম তিনটি রাশি বার কর।

উঃ $y' = \frac{2a}{\pi}(\sin \omega t + \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t)$

(*ii*) আর এক শ্রেণীর করাত-দন্তুর তরঙ্গে $t=0$ মুহূর্তে $y=0$ এবং $t=T$ মুহূর্তে $y=c$ থাকে, অর্থাৎ $t=0$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $y=at/T$ [10.21(*a*) চিত্রে y অক্ষ এবং মূলবিন্দু ডান প্রান্তে নিলেই এই তরঙ্গের কাল-সরণ রেখার চেহারা মিলবে] ; তার ফুরিয়ার-প্রসারণ কি হবে ?

উঃ $y = \frac{c}{2} + \frac{c}{\pi}(\sin \omega t + \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\,\omega t)$

(৪) **আয়তাকার তরঙ্গ** (Top-hat curve) **:** এক্ষেত্রে কাল-সরণ রেখা (চিত্র 10-22) $ABCDEF$ দিয়ে নির্দেশিত।

এক্ষেত্রে $t=0$ থেকে $t=T/2$ পর্যন্ত $y=+c/2$

$t=T/2$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $y=-c/2$

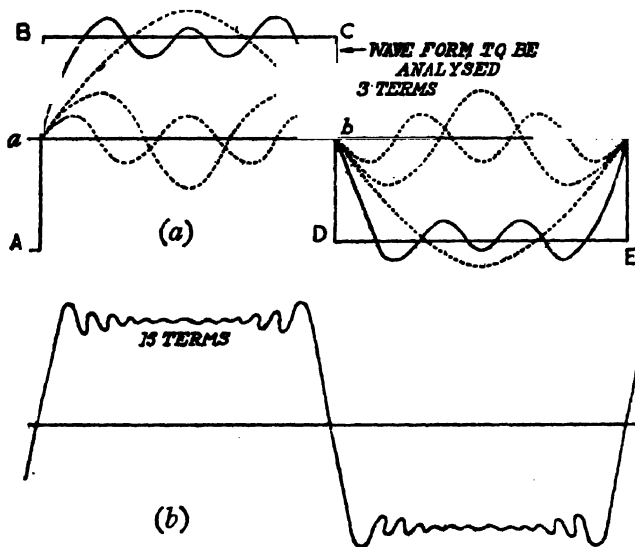
সমাধান : $y = \frac{1}{2}a_0 + \Sigma(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$ (১০-১২.৭)

এখন $\frac{1}{2}a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T y.\,dt = \frac{1}{T}\left[\int_0^{T/2} y.\,dt + \int_{T/2}^T y.\,dt\right]$

$= \frac{1}{T}\left[\int_0^{T/2} \frac{c}{2}\,dt + \int_{T/2}^T - \frac{c}{2}\cdot dt\right]$

$=0$ (১০-১২.৭ক)

তারপর $a_n = \frac{2}{T}\int y \cos n\omega t.\ dt$

$$= \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} \frac{c}{2} \cos n\omega t.\ dt - \int_{T/2}^{T} \frac{c}{2} \cos n\omega t\ dt\right]$$

চিত্র 10.22—আয়ত তরঙ্গ-বিশ্লেষ ও তার সংশ্লেষ-লেখ

$$= \frac{1}{T}\left[\frac{c}{n\omega}\left(\sin n\omega t\right)_0^{T/2} - \frac{c}{n\omega}\left(\sin n\omega t\right)_{T/2}^{T}\right]$$

$$= \frac{2}{T}\left[\frac{c}{n\omega}(\sin n\omega.T/2 - \sin 0 - \sin\ n\omega T\right.$$

$$\left. + \sin n\omega T/2)\right]$$

$$= 0 \qquad (১০\text{-}১২.৭খ)$$

এবং $b_n = \frac{2}{T}\int_0^T y \sin n\omega t.\ dt$

$$= \frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} \frac{c}{2} \sin n\omega t.\ dt - \int_{T/2}^{T} \frac{c}{2} \sin n\omega t.\ dt\right.$$

$$= \frac{1}{T}\left[\frac{c}{n\omega}\left(-\cos n\omega t\right)_0^{T/2} + \frac{c}{n\omega}\left(\cos n\omega t\right)_{T/2}^{T}\right]$$

$$=\frac{c}{n\omega}\Big[(-\cos n\omega T/2+\cos 0 + \cos n\omega T-\cos n\omega T/2\Big]$$

$$=\frac{c}{n\pi}(1-\cos n\pi) \qquad (১০\text{-}১২.৭গ)$$

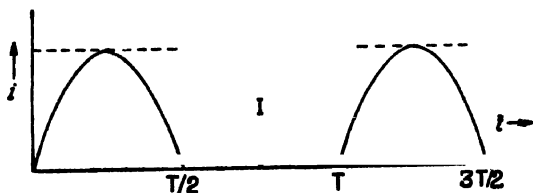
এখন n যুগ্মসংখ্যা হলে, $(1-\cos n\pi)=0$ এবং অযুগ্মসংখ্যা হলে, $(c/n\pi)(1-\cos n\pi)=(c/n\pi).\ 2=2c/n\pi$

$$\therefore \quad y=+\frac{2c}{\pi}\left(\sin \omega t+\frac{\sin 3\omega t}{3}+\frac{\sin 5\omega t}{5}+\cdots\right) \qquad (১০\text{-}১২.৮)$$

এক্ষেত্রে কেবল অযুগ্ম সাইন সমমেলগুলিই থেকে যায় এবং বিস্তারক্ষয়হার অযুগ্ম স্বাভাবিক সংখ্যার ব্যস্তানুপাতিক হয়। 10.22(a) চিত্রে বিশ্লেষ্য রেখার তিনটি প্রথম সমমেল ভাঙা-ভাঙা রেখার সাহায্যে দেখানো হয়েছে এবং তাদের যোগ করলে কি হবে তা টানা রেখায় দেখানো হয়েছে ; 10.22(b) চিত্রে 15টি সমমেল জুড়লে, লব্ধ কাল-সরণ রেখা দেখানো হয়েছে। এটি বিশ্লেষ্য রেখার কাছাকাছি এসেছে।

প্রশ্ন ঃ ওপরের চিত্রে abc অক্ষকে ADE বরাবর নামিয়ে আনলে ফুরিয়ার-প্রসারণ কি হবে ?

উঃ $y=\frac{c}{2}+\frac{2c}{\pi}(\sin \omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\frac{1}{5}\sin 5\omega t+\cdots)$

(৫) অর্ধশোধিত প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা (চিত্র 10.23) ঃ ডায়োড

চিত্র 10.23—অর্ধশোধিত বিদ্যুৎ-ধারা

ভাল্‌ভের প্লেট ও ক্যাথোডের মধ্যে প্রত্যাবর্তী বিভববৈষম্য প্রয়োগ করলে প্লেট-বর্তনীতে এইজাতীয় বিদ্যুৎপ্রবাহ ঘটে। [প্রথম উদাহরণের পূর্ণ শোধিত

ধারা পেতে ডুয়ো-ডায়োড (অর্থাৎ একই ভাল্‌ভে দুটি প্লেট এবং একটি মাত্র ক্যাথোড) লাগে]। এখানে বিদ্যুৎ-ধারার সমীকরণ হয়

$$t=0 \text{ থেকে } t=T/2 \text{ পর্যন্ত} \quad i=I\sin\omega t$$

$$t=T/2 \text{ থেকে } t=T \text{ পর্যন্ত} \quad i=0$$

সমাধান : $$i=f(\omega t)=\tfrac{1}{2}a_0+\sum_{n=1}^{n=\infty} a_n\cos n\omega t$$

$$+\sum_{n=1}^{n=\infty} b_n\cos n\omega t \qquad (১০\text{-}১২.৯)$$

এখন $$\frac{a_0}{2}=\frac{1}{T}\int_0^T i\,dt=\frac{1}{T}\left[\int_0^{T/2} I\sin\omega t.\,dt+\int_{T/2}^{T} 0.\,dt\right]$$

$$=\frac{I}{T\omega}\Big(-\cos\omega t\Big)_0^{T/2}=\frac{I}{2\pi}\Big(1-\cos\pi\Big)$$

$$=\frac{I}{\pi} \qquad (১০\text{-}১২.৯ক)$$

তারপর $$a_n=\frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} I\sin\omega t.\cos n\omega t.\,dt\right.$$

$$\left.+\int_{T/2}^{T} 0.\cos n\omega t.\,dt\right]$$

$$=\frac{2I}{T}\int_0^{T/2}\tfrac{1}{2}\left[\sin(1+n)\omega t+\sin(1-n)\omega t\right]dt$$

$$=\frac{-I}{T\omega}\left[\frac{\cos(1+n)\pi}{1+n}-\frac{1}{n+1}\right.$$

$$\left.+\frac{\cos(1-n)\pi}{1-n}-\frac{1}{1-n}\right] \qquad (১০\text{-}১২.৯খ)$$

$n=1$ বসালে, বন্ধনীর মধ্যের রাশিটি শূন্য হবে। তারপর $n=2, 3, 4,$ ইত্যাদি হলে,

$$a_2=\frac{I}{\pi}\left(\frac{1}{3}-1\right),\ a_3=0,\ a_4=\frac{I}{5}\left(\frac{1}{5}-\frac{1}{3}\right),\ a_5=0, \text{ ইত্যাদি ;}$$

অর্থাৎ কোসাইন পদরাশির যুগ্ম সমমেলগুলি মাত্র থাকে।

তারপর $b_n=\frac{2}{T}\int_0^T I\sin\omega t.\sin n\omega t.\,dt$

$$=\frac{2}{T}\left[\int_0^{T/2} I\sin\omega t.\ \sin\ n\omega t.\,dt+\int_{T/2}^{T}0.dt\right]$$

$$=\frac{2I}{T\omega}\,\tfrac{1}{2}\left[\int_0^{T/2}\{\cos(n-1)\omega t-\cos(n+1)\omega t\}dt\right]$$

$$=\frac{I}{\pi}\left[\left\{\frac{\sin(n-1)\,\omega t}{n-1}\right\}_0^{T/2}-\left\{\frac{\sin(n+1)\omega t}{n+1}\right\}_0^{T/2}\right]$$

(১০-১২.৯গ)

এখানে $n=1$ বসালে, বন্ধনীর মধ্যে প্রথম রাশি শূন্য আর দ্বিতীয় রাশি $-\pi/2$ হবে। অতএব $b_1=I/2$ হবে। তা ছাড়া, $n=2, 3, 4$ যাই বসানো যাক না কেন, বন্ধনীর মান শূন্য হবে। সুতরাং

$$y=\frac{a_0}{2}+\text{কোসাইন পদগুলির যুগ্ম পদাবলী}+\text{সাইন পদশ্রেণীর প্রথমটি}$$

$$=\frac{I}{\pi}-\frac{I}{\pi}\left(\frac{2}{3}\cos 2\omega t+\frac{2}{15}\cos 4\omega t+\cdots\right)+\frac{I}{2}\sin\omega t$$

$$=\frac{I}{\pi}(1+\tfrac{1}{2}\pi\sin\omega t-\tfrac{2}{3}\cos 2\omega t-\tfrac{2}{15}\cos 4\omega t-\cdots)$$

(১০-১২.১০)

এক্ষেত্রে একটি দিষ্ট উপাংশ, একটি সাইন পদ, আর বাকীগুলি কোসাইন পদশ্রেণী হ'ল বিশ্লেষণ-ফল।

১০-১৩. আলোচিত উদাহরণগুলি থেকে সংগৃহীত তথ্য :

ক. আংশিক ফুরিয়ার-শ্রেণী : সম্পূর্ণ ফুরিয়ার-প্রসারণে একটি ধ্রুবরাশি, একটি কোসাইন পদশ্রেণী, একটি সাইন পদশ্রেণী (১০-১১.১) থাকার কথা ; দোলরাশি, সে সাইনই হোক বা কোসাইনই হোক, তাদের কম্পাংকগুলি সমমেল হবার কথা।

কিন্তু ১০-১২ অনুচ্ছেদে আমরা দেখলাম যে, প্রথম দুটি উদাহরণে কেবলমাত্র কোসাইন পদগুলি, আর পরের দুটিতে কেবলমাত্র সাইন পদগুলি

রয়েছে। অবশ্য ধ্রুবপদগুলিও আছে। একজাতীয় পদাবলী থাকলে, সেই ফুরিয়ার-প্রসারণকে **আংশিক ফুরিয়ার-শ্রেণী** বলে।

(১) ধরা যাক, t_0 কোন স্পন্দনের অর্ধপর্যায়কালের ($\frac{1}{2}T$) চেয়ে কম সময়। এখন ($\frac{1}{2}T-t_0$) এবং ($\frac{1}{2}T+t_0$) মুহূর্তে ঐ স্পন্দনের কোটির (y) মান যদি সমান এবং চিহ্ন একই হয়, তবে ফুরিয়ার-প্রসারণে কেবলমাত্র **কোসাইন** পদগুলি থাকবে। লক্ষণীয় যে, পূর্ণশোধিত বিদ্যুৎ-ধারা এবং ত্রিভুজাকার তরঙ্গে কাল-সরণ রেখা $\frac{1}{2}T$ মানের আগে-পিছে প্রতিসম বা সমতল দর্পণে বিম্বের মতো।

(২) আবার যদি ($\frac{1}{2}T-t_0$) এবং ($\frac{1}{2}T+t_0$) মুহূর্তে কোটির (y) মান $\frac{1}{2}T$ মুহূর্তে কোটির মানের চেয়ে যথাক্রমে কম বা বেশী অথবা বিপরীত-ক্রমে হয়, তবে প্রসারণ **আংশিক সাইন-শ্রেণী** হবে। করাত-দন্তুর বা বর্গ তরঙ্গের ফুরিয়ার-প্রসারণ এইজাতীয়।

সুতরাং এইভাবে প্রথমেই বিচার ক'রে, প্রসারণে সাইন পদ না কোসাইন পদগুলি থাকবে স্থির করতে পারলে, বিশ্লেষণ সংক্ষিপ্ত করা যায়। আমরা এই বিশ্লেষণ-সংক্ষেপের বিচার আরও একভাবে করতে পারি; নিচে তা বলা হচ্ছে।

খ. যুগ্ম ও অযুগ্ম অপেক্ষক ঃ যদি কোন ক্ষেত্রে $f(t)=f(-t)$ হয়, তাকে আমরা যুগ্ম এবং $f(-t)=-f(t)$ হলে, তাকে অযুগ্ম অপেক্ষক ব'লবো। যেহেতু $\cos(\omega t)=\cos(-\omega t)$ হয়, তাই যুগ্ম অপেক্ষকের প্রসারণে কেবল কোসাইন-পদশ্রেণী থাকবে; আর $\sin(-\omega t)=-\sin\omega t$ হয় ব'লে, অযুগ্ম অপেক্ষকের প্রসারণে কেবলমাত্র সাইন-পদশ্রেণী থাকবে; অর্থাৎ **যুগ্ম অপেক্ষকের প্রসারণ আংশিক কোসাইন-পদশ্রেণী আর অযুগ্ম অপেক্ষকের প্রসারণ আংশিক সাইন-পদশ্রেণী।** সুতরাং এই দৃষ্টিকোণ থেকে বিচার ক'রেও বিশ্লেষণে শ্রমসংক্ষেপ সম্ভব।

যুগ্ম অপেক্ষকের লেখচিত্রে, y-অক্ষ সাপেক্ষে সমতল দর্পণে লক্ষ্য-বিম্বের মতো প্রতিসাম্য থাকে; 10.19 ও 10.20 চিত্রে $\frac{1}{2}T$ রেখা সাপেক্ষে তাই পরিস্ফুট। লক্ষ্য কর, কোসাইন অপেক্ষকে আবার, খাড়া অক্ষ সাপেক্ষে দর্পণ-প্রতিসাম্য (mirror-image symmetry) রয়েছে।

অযুগ্ম অপেক্ষকের বেলায় t-অক্ষ $y=0$ থেকে $y=c/2$-তে সরানো হলে, তখন দুই অপেক্ষকই অযুগ্ম হয়ে যায়, অর্থাৎ t-র সমান ধন- বা

ঋণ-মানে, y-র চিহ্ন বিপরীতমুখী হয়ে যায়। 10.22(a) এবং 10.21(a) চিত্র দুটিতে যে আভাষ দেখানো হয়েছে।

অবশ্য অনেক অপেক্ষকই যুগ্ম বা অযুগ্ম কোন শ্রেণীতেই পড়ে না। অর্ধশোধিত প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার ফুরিয়ার-প্রসারণ (১০-১২.১০) তার উদাহরণ।

গ. অপেক্ষককে অসন্তুতি ও গড় মান: ১০-১২.৬ সমীকরণের সঙ্গে পরবর্তী প্রথম প্রশ্নের উত্তরের এবং ১০-১২.৮-এর সঙ্গে পরবর্তী প্রশ্নের উত্তর তুলনা করলে দেখা যাবে যে এদের পর্যাবৃত্ত পদগুলি একই থাকছে, তফাৎ হচ্ছে ধ্রুবপদটির উপস্থিতি বা অনুপস্থিতি। যখন $t=0$ মুহূর্তে $y=0$, তখন ধ্রুবপদ থাকছে, কিন্তু যখন $t=0$ মুহূর্তে $y=c/2$ হচ্ছে তখন আর থাকছে না। তখন $t=0$ থেকে $t=\frac{1}{2}T$ পর্যন্ত $y'=+c/2$ আর $t=\frac{1}{2}T$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $y'=-c/2$, অর্থাৎ t-অক্ষকে সমান্তরালে $c/2$ দূরত্ব ওপরে ওঠালে ধ্রুবপদটি লোপ পায় ; এই ধ্রুবপদটি অর্থাৎ $a_0/2=c/2=$ অপেক্ষক y-এর গড় মান $\left(\frac{1}{T}\int_0^T y.\, dt\right)$; তাই y-এর মানে, t অক্ষ-সাপেক্ষে প্রতিসাম্য এলেই ধ্রুবপদ আর থাকে না।

10.22(a) এবং 10.21(a) চিত্রে যথাক্রমে abc ও ভাঙা রেখা বরাবর t-অক্ষ ধরলে দেখা যাচ্ছে যে $t=0$, এবং $t=\frac{1}{2}T$ মুহূর্তে অসন্ততি আসছে এবং সেই **অসন্তুতিতেই শ্রেণীর গড়মান আসছে**। এই ঘটনা ফুরিয়ার-প্রসারণের একটি বিশেষ ধর্ম। এই বিশেষত্বগুলিকে নিচে সংক্ষিপ্ত ক'রে দেখানো হয়েছে।

১০-১৪. ফুরিয়ার-প্রসারণের কয়েকটি বিশেষত্ব :

(১) যদি এক পর্যায়কালের মধ্যে অপেক্ষকে অসন্ততি থাকে (যেমন $t=0$, $T/2$, T প্রভৃতি মানে), তাহলে সেই সেই জায়গায় শ্রেণী-সমাহার, অপেক্ষকের গড় মানের সমান।

(২) পর্যায়কালের মধ্যে সীমিত-সংখ্যক অসন্ততি থাকলে সহগগুলির শূন্যমুখে অভিসৃতি (convergence) ঘটে। করাত-দন্তুর স্পন্দনে অভিসৃতি 1/2, 1/3, 1/4, ⋯ এইভাবে হয়, বর্গস্পন্দনে 1/3, 1/5, 1/7, ⋯ অভিসৃতি তুলনায় দ্রুততর।

(৩) যদি অপেক্ষক $f(t)$ সর্বত্রই সন্তত হয়, কিন্তু তার প্রথম অবকল্যে

(derivative) অর্থাৎ $f'(t)$-তে সীমিত-সংখ্যক অন্তরিত (isolated) অসন্ততি থাকে তাহলে অভিসৃতি-ক্রম, $1/n^2$ (ত্রিভুজ-তরঙ্গ) বা $1/(n-1)$ (শোধিত বিদ্যুৎ-ধারা) আরও দ্রুত-ক্ষয়িষ্ণু হয় ($n=1, 2, 3, \cdots$)।

(৪) যুগ্ম হোক বা অযুগ্মই হোক, t-অক্ষ সমান্তরালভাবে $c/2$ পরিমাণ সরালেই অপেক্ষক অযুগ্ম হয়ে যাবে (কেন ?)। দন্তুর, ত্রিভুজ বা বর্গ স্পন্দনে অক্ষ-সরণ বিবেচনা ক'রে দেখ।

১০-১৫. দেশ-সাপেক্ষ অপেক্ষকের ফুরিয়ার-প্রসারণ :

কাল-সাপেক্ষে পর্যাবৃত্ত অপেক্ষক, মোটামুটিভাবে স্পন্দন নির্দেশ করে— আমরা এপর্যন্ত তাই-ই আলোচনা করেছি। পর্যাবৃত্ত তরঙ্গে দেশ-সাপেক্ষ রাশিও থাকবে—তারও ফুরিয়ার-প্রসারণ সম্ভব। তারের এবং বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনে দেশ-সাপেক্ষ অপেক্ষকের বিশ্লেষণ দরকার। ধরা যাক, এক্ষেত্রে $y=f(x)$ এবং নির্ণেয় প্রসারণ-পাল্লা $x=-l$ থেকে $x=l$ পর্যন্ত বা $x=0$ থেকে $x=2l$ পর্যন্ত বিস্তৃত ; স্থাণুতরঙ্গবিশ্লেষণে এই ধরনের অপেক্ষকই আসে। তাহলে সেক্ষেত্রে

$$y=\frac{a_0}{2}+a_1 \cos \omega x+a_2 \cos 2\omega x+\cdots+b_1 \sin \omega x + b_2 \sin 2\omega x+\cdots$$

এখানে ω-র মান T অন্তরে অন্তরে আবৃত্ত না হয়ে $2l$ অন্তরে আবৃত্ত হচ্ছে, অর্থাৎ $\omega=2\pi/2l=\pi/l$। সুতরাং মৌল সমীকরণ হয়ে দাঁড়াবে

$$y=f(\omega x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{n=\infty}\left(a_n \cos \frac{n\pi x}{l}+b_n \sin \frac{n\pi x}{l}\right) \qquad (১০\text{-}১৫.১)$$

আগের মতোই এখানেও $a_0=\frac{1}{l}\int_{-l}^{+l} f(x).dx$ (১০-১৫.২ক)

$$a_n=\frac{1}{l}\int_{-l}^{+l} f(x).\cos \frac{n\pi x}{l}.dx \qquad (১০\text{-}১৫.২খ)$$

$$b_n=\frac{1}{l}\int_{-l}^{+l} f(x).\sin \frac{n\pi x}{l}.dx \qquad (১০\text{-}১৫.২গ)$$

এখানে মোট পাল্লা $-l$ থেকে $+l$ পর্যন্ত এবং $x=0$ মানটি পাল্লার মাঝামাঝি নেওয়া হয়েছে। প্রয়োজনে সমাকলন, $x=0$ থেকে $x=2l$ পর্যন্তও করতে হয়।

১০-১৫.১-কে আরও সংক্ষেপে **সূচক-আকারে** প্রকাশ করা যায়। $f(\omega x)=f(2\pi nx)=f(X)$ যদি $-\pi$ থেকে $+\pi$-পাল্লায় মধ্যে আবৃত্ত হয়, তাহলে

$$y=f(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{n=\infty}\left(a_n\cos nX+b_n\sin nX\right)$$

(১০-১৫.৩)

$$\therefore\quad \cos nX=\tfrac{1}{2}(e^{jnX}+e^{-jnX})$$

এবং $\sin nX=\frac{1}{2j}(e^{jnX}-e^{-jnX})$

$$\therefore\quad a_n\cos nX+b_n\sin nX$$

$$=\frac{a_n}{2}(e^{jnX}+e^{-jnX})+\frac{jb_n}{2}(e^{-jnX}-e^{jnX})$$

$$=\tfrac{1}{2}(a_ne^{jnX}-jb_ne^{jnX})+\tfrac{1}{2}(a_ne^{-jnX}+jb_ne^{-jnX})$$

$$=\tfrac{1}{2}(a_n-jb_n)\,e^{jnX}+\tfrac{1}{2}(a_n+jb_n)\,e^{-jnX}$$

$$=c_n\,e^{jnX}+c_{-n}\,e^{-jnX}$$ (১০-১৫.৪)

এখন $a_0/2=c_0$ ধরলে, $y=f(X)=\sum_{n=-\infty}^{n=+\infty}c_ne^{jnX}$ (১০-১৫.৫)

এবং $c_n=\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{+\pi}f(X).e^{-jnX}.dx$ (১০-১৫.৬)

উদাহরণ : দেশ-সরণ রেখা $y=f(x)$ যখন $x=0$ থেকে $x=\pi$ পর্যন্ত $y=c$ এবং $x=\pi$ থেকে $x=2\pi$ পর্যন্ত $y=-c$ তখন ফুরিয়ার-প্রসারণ কি হবে ?

সমাধান : অপেক্ষকটি মধ্যমান π সাপেক্ষে প্রতিসম, অর্থাৎ একে

বর্গাকৃতি তরঙ্গ বলা চলে। সুতরাং এক্ষেত্রে কেবল সাইন পদগুলি থাকবে আর প্রথম ধ্রুবকটি থাকবে না। তাহলে

$$y=f(x)=\sum_{n=1}^{n=\infty} b_n \sin nx$$

$$\therefore \quad b_n=\frac{2}{2\pi}\int_0^{2\pi} y \sin nx.dx$$

$$=\frac{1}{\pi}\left[\int_0^{\pi} c \sin nx.dx+\int_{\pi}^{2\pi} -c.\sin nx.dx\right.$$

$$=\frac{c}{\pi n}\left[-\left(\cos nx\right)_0^{\pi}+\left(\cos nx\right)_{\pi}^{2\pi}\right]=\frac{4a}{\pi n}$$

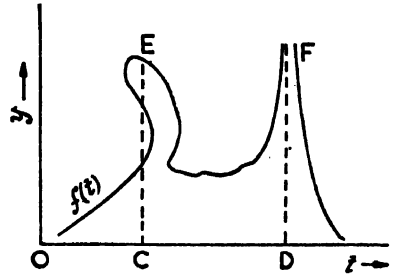
$$\therefore \quad y=\frac{4a}{\pi}\left(\sin x+\frac{\sin 3x}{3}+\frac{\sin 5x}{5}+\cdots\right)$$

সমঞ্জস বিশ্লেষণ-ব্যবস্থা : ওপরে আলোচিত স্পন্দনগুলি অপেক্ষাকৃত সরল। জটিলতর স্পন্দনরেখা প্রায়ই মেলে। তাদের আঙ্গিক দোলনগুলিকে এইভাবে গণনা ক'রে বার করা দীর্ঘসময় এবং গভীর পরিশ্রমসাপেক্ষ। কাজেই a_0, a_n, b_n প্রভৃতির সমাকলন করতে যন্ত্রের উদ্ভাবন হয়েছে। প্রয়োজনমতো মাপের বিশ্লেষ্য সরণরেখাটি বিশ্লেষক-যন্ত্রের ভূমিতে বসিয়ে, তার সূচকটিকে রেখা বরাবর বোলানো হয়। তার পাঠ থেকে প্রথম কয়েকটি পদের আপেক্ষিক বিস্তার পাওয়া যায়। কেল্‌ভিন, হেনরিসি, মাইকেলসন, স্ট্র্যাটন প্রভৃতি বিজ্ঞানীদের উদ্ভাবিত এইসব যান্ত্রিক বিশ্লেষক নির্দিষ্ট-সংখ্যক পদ নির্ণয় করে; নির্ণীত পদের সংখ্যা তাদের গঠনের জটিলতার ওপর নির্ভর করে। আধুনিক ইলেকট্রনীয় বিশ্লেষক এইজাতীয় কাজে সবচেয়ে উপযোগী। তাদের মধ্যে একটি হেটেরোডাইন-শ্রেণীর যন্ত্র ১৬ অধ্যায়ে বর্ণিত হয়েছে।

১০-১৬. ফুরিয়ার-উপপাদ্যের সর্বগ্রাহ্য রূপ এবং প্রয়োগ-সীমা :

পর্যাবৃত্ত অপেক্ষক ছাড়াও, অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষকের বিশ্লেষণেও ফুরিয়ার-উপপাদ্য প্রসারিত করা যায়। সে আলোচনা করতে উপপাদ্যের সর্বগ্রাহ্য (general) বিবৃতি, তার প্রয়োগে সর্তসাপেক্ষতা এবং সীমাবন্ধন জানা থাকা দরকার।

Dirichlet-এর সর্তাবলী ঃ ধরা যাক, $f(\theta)$ কোন বাস্তব স্বাধীন চররাশি θ-র অপেক্ষক। $c < \theta < d$ পাল্লার মধ্যে তার মান জানা আছে। এই অপেক্ষকের ফুরিয়ার-বিশ্লেষণ হতে হলে, তাকে (১) ঐকমান (single-valued) হতে হবে, আর সেই অপেক্ষকের (২) কয়েকটি মাত্র সীমিত অসন্ততি এবং (৩) কয়েকটি মাত্র চরম ও অবমমান থাকতে পারবে। এই তিনটি বন্ধনই Dirichlet-প্রস্তাবিত সর্তাবলী। নির্দিষ্ট পাল্লায় এই সর্তাধীন অপেক্ষককে ঐ পাল্লার অন্তর্বর্তী খণ্ডিত সুষম (piece-wise regular) বলে। আলোচিত সব অপেক্ষকগুলিই এই বন্ধন মেনে চলে।

বাস্তব স্পন্দনে ফুরিয়ার-উপপাদ্যের প্রয়োগ-সীমা ঃ বাস্তব স্পন্দনমাত্রেই দুটি সীমাবন্ধন মানতে বাধ্য—(১) স্পন্দনরেখার কোন অংশই 10.24 চিত্রে CE রেখার মতো আর এক অংশের ওপর ঝুঁকে থাকতে পারবে না। তার অর্থ এই যে, রেখার সর্বত্র, অপেক্ষক y ঐকমান হওয়া দরকার।

চিত্র 10.24—ফুরিয়ার-উপপাদ্যের সীমিতত্ব

(২) স্পন্দনরেখার কোন অংশেই y-এর মান অসীম হলে (যেমন 10.24-এ DF-বরাবর) চলবে না, অর্থাৎ অসন্ততি অসীম-মান হবে না।

মোটামুটিভাবে এই দুটি সীমাবন্ধন Dirichlet-এর প্রথম সর্তভুক্ত। কোন শব্দতরঙ্গই এই দুই নিষেধ অমান্য করতে পারে না ; কেননা কোন মুহূর্তেই (t) একটি বায়ুকণার দুটি পৃথক সরণ (y) হতে পারে না ; আর দমন বা বাধাবল সর্বত্রই সক্রিয় থাকায় স্পন্দনবিস্তার কখনই অসীম-মান হয় না।

ফুরিয়ার-তত্ত্বের সাধারণ বা সর্বগ্রাহ্য বিবৃতি ঃ ডিরিক্‌লেটের সর্তসাপেক্ষে কোন স্বাধীন চররাশির (θ) কোন স্বৈচ্ছিক অপেক্ষক $f(\theta)$-কে $c < \theta < d$ পাল্লার মধ্যে নিম্নলিখিত ত্রিকোণমিতিক রাশিশ্রেণীতে প্রসারিত করা যায়—

$$f(\theta)=\tfrac{1}{2}a_0+a_1\cos\omega\theta+a_2\cos 2\omega\theta+a_3\cos 3\omega\theta+\cdots$$
$$+b_1\sin\omega\theta+b_2\sin 2\omega\theta+b_3\cos 3\omega\theta+\cdots$$
$$=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{n=\infty}(a_n\cos n\omega\theta+b_n\cos n\omega\theta) \quad (\text{১০-১৬.১})$$

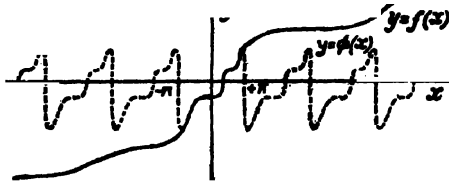
এবং
$$\omega=2\pi/(d-c) \quad (\text{১০-১৬.২})$$

১০-১৬.১ রাশিশ্রেণীকে ফুরিয়ার-শ্রেণী এবং a_0, a_n, b_n-কে ফুরিয়ার-সহগ বলে। তবে নির্দিষ্ট পাল্লার মধ্যেই এর প্রসার কার্যকর। 10.25 চিত্রে দেখানো হয়েছে যে, পাল্লার বাইরে প্রসারণ পর্যাবৃত্ত, কিন্তু $f(\theta)$ তা নাও হতে পারে। এক সম্পূর্ণ চক্রের মধ্যে অপেক্ষক পর্যাবৃত্ত হলে, তার সর্বত্রই ফুরিয়ার-প্রসারণ সম্ভব। তখন $\omega=1$ হবে এবং ফুরিয়ার-ক্রম ১০-১৫.৩-এর মতো

$$f(\theta)=\tfrac{1}{2}a_0+a_1\cos\theta+a_2\cos 2\theta+a_3\cos 3\theta+\cdots$$
$$+b_1\sin\theta_1+b_2\sin 2\theta+\cdots$$

$$=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{n=\infty}(a_n\cos n\theta+b_n\sin n\theta) \qquad (১০\text{-}১৬.৩)$$

১০-১৭. অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষকের ফুরিয়ার-বিশ্লেষণ :

পর্যাবৃত্ত স্পন্দনের বিশ্লেষণ-ব্যবস্থাকে নিম্নলিখিত পদ্ধতিতে, অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষকের ক্ষেত্রে প্রসারিত করা হয়—10.25 চিত্রে টানা রেখাটি অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষক $y=f(x)$ নির্দেশ করছে এবং $\phi(x)$ আর-একটি অপেক্ষক, যেটি $-\pi<x<\pi$ পাল্লার মধ্যে $f(x)$-এর সঙ্গে অভিন্ন কিন্তু পাল্লার বাইরে ভাঙা-ভাঙা রেখা-বরাবর আবৃত্ত। সুতরাং $\phi(x)$-কে ফুরিয়ার-উপপাদ্য অনুযায়ী সরল সমঞ্জস পদশ্রেণীতে বিশ্লেষণ করা যাবে এবং প্রতিজ্ঞানুসারে $-\pi<x<+\pi$ পাল্লার মধ্যে সেই একই প্রসারণ অপেক্ষক $f(x)$-কেও নির্দেশ করবে। এইভাবে যেকোন কাঙ্ক্ষিত (desired) পাল্লার মধ্যে যেকোন অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষককে

চিত্র 10.25—অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষকের বিশ্লেষণ

যথাযোগ্য সরল সমঞ্জস পদশ্রেণী দিয়ে প্রকাশ করা যায়। এই পদগুলির কম্পাংক $\phi(x)$-এর রাশিশ্রেণীর পদগুলির কম্পাংকের গুণিতক হবে। তাহলে ১০-১৫.৩-কে অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষক $f(x)$-এর সরল সমঞ্জস অসীম পদশ্রেণী হিসাবেও ধরা যায় এবং সেই পদগুলির বিস্তার ১০-১৫.৬ সমীকরণ-শাসিত।

এবারে দেখানো হবে যে, পাল্লাসীমা দরকার হলে ইচ্ছামতো $-\infty$ থেকে $+\infty$ পর্যন্ত বাড়ানো সম্ভব। এই অসীম পাল্লার মধ্যে অপেক্ষকটিকে সরল সমঞ্জস পদের এক সন্ততশ্রেণীর আকারে লেখা যায় এবং তাদের কম্পাংক $-\infty$ থেকে $+\infty$-র মধ্যে সম্ভাব্য সব মানেরই হতে পারে।

$f(x)$-কে $-l < x < +l$ পাল্লায় প্রকাশ করতে $x = l\mathrm{x}/\pi$ ধরা যাক। তাহলে ১০-১৫.৫ এবং ১০-১৫.৬ থেকে পাব

$$f(x) = \sum_{n=1}^{n=\infty} c_n e^{jn\mathrm{x}/l}$$

$$c_n = \frac{1}{2l}\int_{-l}^{+l} f(x).e^{-jn\mathrm{x}/l}.dx$$

শেষের সমীকরণে x-এর বদলে আর-এক চররাশি x' বসালে, আসবে

$$f(x) = \frac{1}{2l}\int_{-l}^{+l} f(x').\, e^{jn\pi(x-x')/l}.dx' \qquad (১০\text{-}১৭.১)$$

ডানদিকের পদ-সমাহারকে $-l < x' < +l$ পাল্লায় $f(x)$-এর প্রতিভূ ব'লে ধরা যায়। তখন l-কে ইচ্ছামতো প্রসারিত ক'রে প্রয়োজনমতো $\pm\infty$ পর্যন্ত নেওয়া সম্ভব। এই শ্রেণীর n-তম সমমেলের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda_n = 2l/n$ এবং তরঙ্গধ্রুবক $\beta_n = n\pi/l$ হবে।

এখন ধরা যাক, $\beta_{n+1} - \beta_n = \pi/l = \Delta\beta$; তাহলে শেষ সমীকরণটির আকার দাঁড়াবে

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\sum_{n=1}^{n=\infty} \Delta\beta \int_{-l}^{+l} f(x')\, e^{jn\Delta\beta(x-x')}.dx' \qquad (১০\text{-}১৭.২)$$

এখন $n.\Delta\beta = n\pi/l = \beta_n$ এবং $l \to \infty$ হলে, $\Delta\beta \to 0$; তাহলে ১০-১৭.২ থেকে ফুরিয়ার-সমাকল হিসাবে পাচ্ছি

$$f(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} d\beta \int_{-\infty}^{+\infty} f(x') e^{j\beta(x-x')}.dx' \qquad (১০\text{-}১৭.৩)$$

সুতরাং
$$g(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-j\beta x}.dx \qquad (১০\text{-}১৭.৪)$$

ধরলে পাব
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty} g(\beta) e^{j\beta x}.d\beta \qquad (১০\text{-}১৭.৫)$$

অতএব দেখা যাচ্ছে যে অপেক্ষক $f(x)$-কে সরল দোলজাতীয় সন্তত শ্রেণীরূপে

লেখা চলে এবং তাদের বিস্তার $g(\beta)$-র মানের সমান। f এবং g দুই অপেক্ষকের মধ্যে এইজাতীয় সম্পর্ক থাকলে, তাদের পারস্পরিক ফুরিয়ার-রূপান্তরক (Fourier transform) বলে।

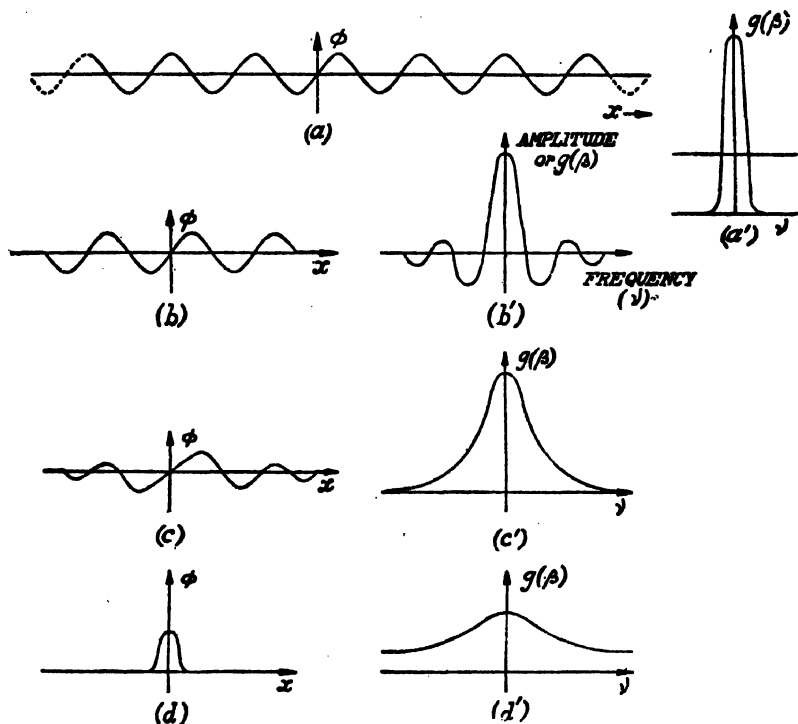
তরঙ্গদল বা সীমিতদৈর্ঘ্য তরঙ্গমালার বিশ্লেষণে ফুরিয়ার-সমাকল অপরিহার্য হাতিয়ার।

১০-১৮. তরঙ্গদল (Wave group):

সরল দোলজাতীয় তরঙ্গের বহুপরিচিত প্রতিরূপ $\xi = \xi_0 \cos \beta (ct - x)$ সরলীকৃত অবাস্তব আদর্শ, কেননা তাতে দেশ (x) বা কাল t কারুর মানই সীমিত নয়। যেকোন নিমেষে সেই তরঙ্গমালা $x = -\infty$ থেকে $x = +\infty$ পর্যন্ত ছড়ানো থাকবে এবং যেকোন বিন্দুতে স্পন্দন $t = 0$ থেকে $t = \infty$ পর্যন্ত চলবে; অর্থাৎ তরঙ্গমালা দেশ এবং কালে অনন্ত। কিন্তু কোন তরঙ্গ-উৎসই নিরন্তর স্পন্দিত হয় না, তার স্পন্দনবিস্তার সমান থাকে না, স্পন্দনদশা সন্তত থাকতে পারে না। কাজেই বাস্তবে সীমিতদৈর্ঘ্য এবং মন্দিতবিস্তার তরঙ্গমালারই উৎপত্তি হয়। 10.26(a) চিত্রে সরল দোলজাতীয় অসীম তরঙ্গমালা, (b)-তে সসীম সেইজাতীয় তরঙ্গমালা এবং (c)-তে সসীম ক্ষয়িষ্ণুবিস্তার তরঙ্গমালার রেখাচিত্র দেখানো হয়েছে। প্রথমটি একেবারেই অবাস্তব এবং দ্বিতীয়ের তুলনায় তৃতীয়টি বেশী সম্ভাব্য।

তরঙ্গদল বলতে, কাছাকাছি কিন্তু ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকের, কতকগুলি একমুখী তরঙ্গমালার উপরিপাতনে উদ্ভূত তরঙ্গরূপকেই বোঝায়। সেই দৃষ্টিভঙ্গীতে, সসীম হ্রস্বতরঙ্গমালাকে [চিত্র 10.26(b)] তরঙ্গদল বলা চলে—সেক্ষেত্রে আন্দোলন সীমিত পাল্লায় সরল দোলজাতীয়, তার বাইরে শূন্য; সুতরাং সে সাইন-তরঙ্গমালা নয়। ফুরিয়ার-তত্ত্বমতে একে, ক্রমান্বয়ে পরিবৃত্ত (varying) কম্পাংকের অসংখ্য সমতলীয় সাইন-তরঙ্গের সমষ্টিফল হিসাবে, দেখা যেতে পারে। তরঙ্গগুলির কম্পাংকপাল্লার ওপরেই তরঙ্গমালার দৈর্ঘ্য নির্ভর করে—এই কম্পাংকপাল্লা যত প্রশস্ত হবে তরঙ্গমালার দৈর্ঘ্য ততই কম হবে।

10.26 চিত্রে (b), (c), (d) সীমিত দৈর্ঘ্যের কয়েকটি তরঙ্গমালা আর (b'), (c'), (d') তাদের কম্পাংক-বণ্টন [frequency (ν) distribution] রেখা। যে তরঙ্গমালা যত হ্রস্ব, তার কম্পাংকপাল্লা ততই প্রশস্ত; আর সে যত দীর্ঘ তার কম্পাংকবণ্টন ততই তীক্ষ্ণশীর্ষ—(a') তার ঠিক উদাহরণ। তরঙ্গমালা যদি সত্যিই অসীমদৈর্ঘ্য হ'ত, তাহলে তার কম্পাংক একটি খাড়া রেখা

হ'ত—সেই তরঙ্গকেই এককম্প (monochromatic) বলা চলে ; বোঝাই যায় যে, তা অসম্ভব। তরঙ্গাবলীর একেবারে নীচে 10.26(*d*) এক ক্ষণ- বা ঘাত (impulse)-তরঙ্গের রূপরেখা—তাতে কিন্তু ধীরে পরিবৃত্ত অসংখ্য কম্পাংক থাকে। শব্দঘাতই অপস্বরের প্রধান কারণ। তারা অপর্যাবৃত্ত-স্পন্দন ; সুতরাং এদের বিশ্লেষণে ফুরিয়ার-সমাকল ও ফুরিয়ার-রূপান্তরের ব্যাপক ব্যবহার দরকার।

চিত্র 10.26—তরঙ্গমালা ও কম্পাঙ্ক-বিস্তার লেখ

তরঙ্গদলের আচরণ এবং সরল দোলজাতীয়- তথা এককম্প-তরঙ্গমালার আচরণে তফাৎ বিস্তর। কোন তরঙ্গদলকে তরঙ্গদৈর্ঘ্যমান-যন্ত্রে (wave-meter) বিশ্লেষণ করলে দেখা যাবে যে, তার সুনির্দিষ্ট কোন তরঙ্গদৈর্ঘ্য নেই, দৈর্ঘ্য $\delta\lambda$ পাল্লা জুড়ে বিস্তৃত (স্বভাবতই সেই পাল্লা 10.26 চিত্রে বিভিন্ন কম্পাংকপাল্লার সঙ্গে তুলনীয়) এবং সেই পাল্লার λ_0 দৈর্ঘ্যেই শক্তির বেশীর ভাগ সংহত ; পাল্লার যে তরঙ্গদৈর্ঘ্য, λ_0 থেকে যত দূরে, তাতে শক্তি তত কম। এই তরঙ্গদৈর্ঘ্যপাল্লা $\delta\lambda = \lambda_0/N$ (যেখানে তরঙ্গদলে অঙ্গতরঙ্গের সংখ্যা N) ;

অর্থাৎ অঙ্গতরঙ্গের সংখ্যা যত বাড়বে, দলীয় দৈর্ঘ্যপাল্লা ততই সংকীর্ণ হবে। কাজেই তারা অসংখ্য হলেই তবে সুনির্দিষ্ট একটিমাত্র দৈর্ঘ্যের সাইন-তরঙ্গমালা পাওয়া সম্ভব ; বাস্তবে তা হতে পারে না।

তরঙ্গদল ও ফুরিয়ার-সমাকল : তরঙ্গদলের গণিতীয় প্রতিরূপ বিশেষরকম জটিল। আগেই দেখেছি যে, একটি তরঙ্গদলের উৎপত্তি ঘটে ক্রমান্বয়ে পরিবৃত্ত কম্পাংকের অসীমসংখ্যক তরঙ্গমালায় সংশ্লেষে। এই অঙ্গতরঙ্গগুলির বিস্তার আবার এমন এমন হওয়া চাই, যাতে উৎপন্ন তরঙ্গদলের তরঙ্গগড়ন যথাযথ হয়। ১০-১৭ অনুচ্ছেদে অপর্যাবৃত্ত স্পন্দনের প্রতিরূপ কি-ভাবে ফুরিয়ার-সমাকল দিয়ে দেখানো যায়, তা আমরা দেখেছি। চিত্র 10.26 বলছে যে, তরঙ্গদলমাত্রেই দেশ-সাপেক্ষে অপর্যাবৃত্ত অপেক্ষক—নিশ্চয়ই তাদেরও ফুরিয়ার-সমাকল দিয়ে দেখানো যাবে।

মনে করি, অসংখ্য সমঞ্জস তরঙ্গের উপরিপাতনে একটি তরঙ্গদল গঠিত ; তাদের তরঙ্গধ্রুবকগুলি $(\beta-\frac{1}{2}\delta\beta)$ থেকে $(\beta+\frac{1}{2}\delta\beta)$-এর মধ্যে আছে। তাদের মধ্যে যেটির তরঙ্গধ্রুবক β, ধরা যাক, তার তরঙ্গবিস্তার $g(\beta)$; তাহলে ১০-১৭.৫ অনুসারে লব্ধি-তরঙ্গের প্রতিরূপ—

$$\phi_{(x,\,t)}=\int_{\beta-\delta\beta/2}^{\beta+\delta\beta/2} g(\beta)\; e^{j\beta\,(ct-x)}.d\beta$$

তরঙ্গবেগ (c) তরঙ্গদৈর্ঘ্য $(\lambda=2\pi/\beta)$-নিরপেক্ষ হলে (স্বনতরঙ্গে তাইই হয়, আলোকতরঙ্গে নয়) এবং $ct-x=0$ সর্ত পূরণ হলে, প্রতিটি তরঙ্গ সমদশা হবে এবং নির্দিষ্ট যেকোন বিন্দুতে মোট সরণ দাঁড়াবে সব বিস্তারগুলির বীজগণিতীয় সমষ্টি, অর্থাৎ $\Sigma g(\beta)$; কিন্তু যদি $ct-x\neq 0$ হয়, তাহলে t মুহূর্তে তারা ভিন্ন ভিন্ন দশায় মিলিত হতে থাকবে, কাজেই লব্ধি-বিস্তার কম হবে। চরম বিস্তার-বিন্দু থেকে দূরত্ব যতই বাড়বে, তাদের মধ্যে দশাভেদ ততই বাড়তে থাকবে এবং তার ফলে তরঙ্গগুলির পরস্পরকে প্রশমিত করার প্রবণতাও বাড়বে—অনেক দূরে ব্যতিচার হয়ে, মোট সরণ শূন্য হবে। $\delta\beta$ পাল্লা যত সংকীর্ণ হবে, শূন্যসরণ-বিন্দু ততই চরম সরণবিন্দুর কাছাকাছি আসবে। এইভাবেই তরঙ্গদলের প্রতিরূপ এবং দৈর্ঘ্য নির্দিষ্ট হয়।

১০-১৯. দশাবেগ ও দলবেগ (Wave velocity and Group velocity) :

যদি কোন তরঙ্গদলের সব অঙ্গতরঙ্গগুলিই সমবেগে চলে, তাহলে তরঙ্গদলও সেই বেগে চলবে এবং তার আকার অক্ষুণ্ণ থাকবে। কিন্তু যদি তরঙ্গ- বা

দশাবেগ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সঙ্গে বদলায়, তাহলে কিন্তু তরঙ্গদলের গড়ন বা আকার বদলাবে। এই ঘটনাই আলোর ক্ষেত্রে সুপরিচিত ধর্ম, বিচ্ছুরণ—কাচে লাল আলো ($\lambda_R = 0.7$ মাইক্রন) বেগুণী আলোর ($\lambda_V = 0.4\mu$) প্রায় 1.8 গুণ বেগে চলে। বিচ্ছুরণের পরিমাণ মাধ্যমের ওপর নির্ভর করে। **কোন মাধ্যমেই স্বন-তরঙ্গের বিচ্ছুরণ হয় না, স্বনোত্তর তরঙ্গের কিন্তু হয়।**

কোন তরঙ্গদলের মধ্যে ভিন্ন ভিন্ন অঙ্গগুলির তরঙ্গবিস্তার ও দশা এমন থাকে যে, দলের মাঝেরটির তরঙ্গবিস্তার চরম থাকে এবং তার দু'ধারে কমতে কমতে শূন্য হয়ে যায়। বিচ্ছুরণ ঘটলে এই চরমবিস্তার, অঙ্গতরঙ্গগুলি থেকে আলাদা বেগে চলে; তার গতিবেগকেই **দলবেগ** বলে। তরঙ্গবাহিত শক্তি দলবেগেই চলে। ব্যাপারটা, পুকুরের স্থির জলে ঢিল ফেললে চাক্ষুষ দেখা যায়; তখন একদল তরঙ্গ জলে ছড়াতে থাকে, কিন্তু লক্ষ্য করলে দেখা যায় যে, একক বা স্বতন্ত্র ঢেউগুলি দলের চেয়ে দ্রুততর চলছে; এই ঢেউগুলি দলের পেছনে দেখা দেয়, তারপর ক্রমে দলের মধ্যে দিয়ে এগিয়ে যায়, শেষে দলের সামনে গিয়ে মিলিয়ে যায়, আবার পেছন থেকে সুরু হয়; অর্থাৎ, এখানে দশাবেগ (c) দলবেগের (c_g) চেয়ে বেশী। দীর্ঘতর তরঙ্গ, তুলনায় দ্রুততর চললে এই ব্যাপার হয়—আলোর ক্ষেত্রে এই ঘটনাই হয়। স্বন-তরঙ্গে তারা সবাই সমবেগ।

দশাবেগ ও দলবেগের মধ্যে সম্পর্ক প্রতিষ্ঠা করতে আমরা সমবিস্তারের মাত্র দুটি সমঞ্জস তরঙ্গমালার উপরিপাতন আলোচনা ক'রবো—তাদের বেগ (c, এবং $c+\delta c$) এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ, $\lambda+\delta\lambda$) মধ্যে তফাৎ সামান্যই। তাহলে তাদের ক্রিয়ায় কোন কণার যুক্ত সরণ দাঁড়াবে :

$$\xi = \xi_0 \cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x) + \xi_0 \cos\frac{2\pi}{\lambda+\delta\lambda}[(c+\delta c)t - x]$$

$$= 2\xi_0\left[\cos\pi\left\{\left(\frac{c}{\lambda}+\frac{c+\delta c}{\lambda+\delta\lambda}\right)t - \left(\frac{1}{\lambda}+\frac{1}{\lambda+\delta\lambda}\right)x\right\}\right.$$

$$\left.\times\cos\pi\left\{\left(\frac{c}{\lambda}-\frac{c+\delta c}{\lambda+\delta\lambda}\right)t - \left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda+\delta\lambda}\right)x\right\}\right]^*$$

(১০-১৯.১)

* $\cos A + \cos B = 2\cos\frac{1}{2}(A+B)\cos\frac{1}{2}(A-B)$

এখন যদি $\delta\lambda \ll \lambda$ হয়, তাহলে $\lambda(\lambda+\delta\lambda) \simeq \lambda^2$ হবে এবং তাহলে

$$\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda+\delta\lambda}=\frac{\delta\lambda}{\lambda^2} \qquad (১০-১৯.২)$$

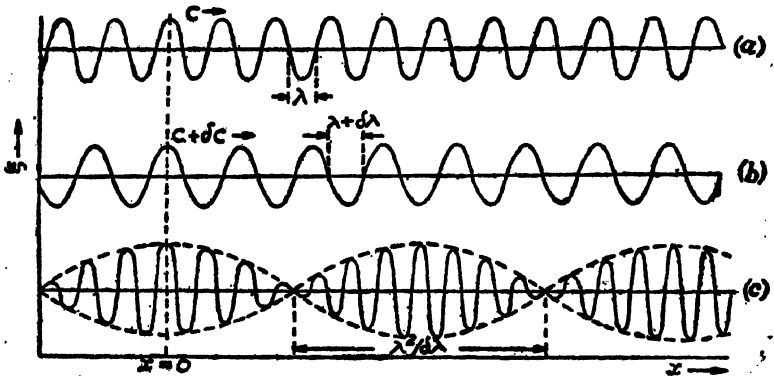
এবং $$\frac{c}{\lambda}-\frac{c+\delta c}{\lambda+\delta\lambda}=\frac{c.\delta\lambda-\lambda.\delta c}{\lambda^2}=\delta(c/\lambda) \qquad (১০-১৯.৩)$$

হবে এবং মোট সরণ দাঁড়াবে

$$\xi=2\xi_0 \cos\frac{2\pi}{\lambda}(ct-x)\cos\frac{2\pi.\delta\lambda}{2.\lambda^2}\left(\frac{c.\delta\lambda-\lambda.\delta c}{\delta\lambda}\cdot t-x\right)$$

$$(\because \quad c \gg \delta c) \qquad (১০-১৯.৪)$$

10.27 চিত্রে (a) এবং (b) দুটি স্বতন্ত্র তরঙ্গের এবং (c) উপরিপাতিত তরঙ্গের দেশ-সরণ রেখা (১০-১৯.৪) ; এই প্রতিরূপের প্রথম অংশটি ছোট

চিত্র 10.27—দশাবেগ ও দলবেগ

অঙ্গতরঙ্গের সমবেগ ও দৈর্ঘ্যের একটি তরঙ্গ নির্দেশ করছে ; সেই তরঙ্গের বিস্তার কিন্তু আর-এক মন্থরতর পরিবৃত্তির আচ্ছাদন (envelope)-তরঙ্গের ক্রিয়ায় পরিবর্তিত (modulated) হচ্ছে—সেই আচ্ছাদনের তরঙ্গদৈর্ঘ্য $2\lambda^2/\delta\lambda$, আর বেগ $(c.\delta\lambda-\lambda.\delta c)/\delta\lambda$ । আচ্ছাদন-তরঙ্গ এইভাবেই তরঙ্গদলের সৃষ্টি করে এবং সেই দলবেগ

$$c_g=\frac{c.\delta\lambda-\lambda.\delta c}{\delta\lambda}=c-\lambda\cdot\frac{\delta c}{\delta\lambda} \qquad (১০-১৯.৫)$$

এর থেকেই দেখা যাচ্ছে যে, (১) তরঙ্গদৈর্ঘ্য বাড়লে তরঙ্গবেগ যদি বাড়ে তাহলে

দশাবেগ দ্রুততর হবে, (২) বিচ্ছুরণ না হলে (অর্থাৎ তরঙ্গবেগ তরঙ্গদৈর্ঘ্য-নিরপেক্ষ হলে) দশাবেগ দলবেগের সমান হবে, আর (৩) দৈর্ঘ্য বাড়লে যদি তরঙ্গবেগ কমে তাহলে দলবেগ দ্রুততর হবে। এই সিদ্ধান্তগুলি এখানে সরল ক্ষেত্রে নির্ণীত হলেও সব জটিল তরঙ্গদলের ক্ষেত্রেই সমভাবে প্রযোজ্য।

তরঙ্গদলের চরমবিস্তার যেখানে ঘটে সেখানে দশা শূন্য, অর্থাৎ $ct-x=0$ বা $x=ct$; অঙ্গতরঙ্গগুলির বেগ যদি তরঙ্গদৈর্ঘ্য-নিরপেক্ষ হয় তাহলে তারা সবাই সমবেগে $(c=\dot{x})$ চলবে এবং অপেক্ষক $\phi=f(ct-x)$ অপরিবর্তিত থাকে ব'লে তরঙ্গদলের তরঙ্গরূপ অক্ষুণ্ণ থাকে। কিন্তু $c=f(\lambda)$ হলে, দশাবেগ ও দলবেগে প্রভেদ আসে।

দলবেগের বিকল্প প্রতিরূপ বার করলে ক্ষেত্রান্তরে সুবিধা হয়। এখন স্পন্দনাংক

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi c}{\lambda}=\beta c$$

$$\therefore \quad \frac{d\omega}{d\beta}=\beta\frac{dc}{d\beta}+c=\frac{2\pi}{\lambda}.\frac{dc.\lambda^2}{-2\pi.d\lambda}+c=c-\lambda.\frac{dc}{d\lambda}$$

$$\therefore \quad c_g=\frac{d\omega}{d\beta} \qquad (১০\text{-}১৯.৬)$$

তাহলে $$\frac{1}{c_g}=\frac{d\beta}{d\omega}=\frac{d}{d\omega}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)=\frac{d}{d\omega}\left(\frac{2\pi\nu}{c}\right)=\frac{d}{d\omega}\left(\frac{\omega}{c}\right)$$

$$=\frac{1}{c}-\frac{\omega}{c^2}.\frac{dc}{d\omega} \qquad (১০\text{-}১৯.৭)$$

আলোর ক্ষেত্রে কোন মাধ্যমের প্রতিসরাংক $\mu=c_0/c$ ব'লে

$$d\mu=-(c_0/c^2).dc \qquad (১০\text{-}১৯.৮)$$

$$\therefore \quad \frac{1}{c_g}=\frac{1}{c}-\frac{\omega.dc}{c^2 d\omega}=\frac{1}{c}+\frac{\omega}{c_0}.\frac{d\mu}{d\omega} \qquad (১০\text{-}১৯.৯)$$

এই সূত্রের সাহায্যে আলোর তরঙ্গের দলবেগ নির্ণয় করা যায়।

প্রশ্নমালা

১। কোন নির্দিষ্ট অভিমুখে একই কণার ওপর দুটি সরল দোলন সক্রিয় হলে যদি সরণবিস্তার সমান অথচ দুয়ের মধ্যে দশাভেদ π বা $\pi/2$ থাকে, তাহলে লব্ধি-সরণবিস্তার কত ?

২। ঐ কণার ওপর দোলন-দুটি যদি সমকোণে প্রযুক্ত হয়, তাহলে কণার সঞ্চারপথ কি হবে? যদি দোলন-দুটির বিস্তার আলাদা হয়, তাহলেই বা সঞ্চারপথ কি হবে? যদি পর্যায়কালে সামান্য তফাৎ থাকে, তাহলে?

৩। দেখাও যে, (ক) সরল দোলন দুই বিপরীতমুখী চক্রগতির সমন্বয়ে উৎপন্ন হয়, (খ) দুটি সমকম্পাংক কিন্তু $\pi/2$ দশাভেদযুক্ত পরস্পর সমকোণে সরল দোলন জুড়ে সুষম চক্রগতি পাওয়া যায়।

৪। লিসাজু-চিত্র কি? কি-ভাবে তাদের দেখা সম্ভব? তাদের ব্যবহারিক প্রয়োগ কি? কাছাকাছি কম্পাংকের দুটি দোলন উপরিপাতিত হলে, লিসাজু-চিত্র কি-ভাবে বদলাবে, উদাহরণ-যোগে দেখাও। দুটি সুরশলাকার ক্ষেত্রে লিসাজু-চিত্র অধিবৃত্ত আকার থেকে ইংরেজী 8 সংখ্যার রূপ হয়ে 6 সেকেণ্ড পরে আবার অধিবৃত্তাকারে ফিরে যায়। একটির কম্পাংক 100 হলে, অপরটির কত? [$50 \pm \frac{1}{12}$ বা $200 \pm \frac{1}{6}$]

৫। সীমিত পাল্লায় কোন স্বৈচ্ছিক ফলনের ফুরিয়ার-উপপাদ্য-সম্মত বিস্তৃতিটি লেখ। কি কি সর্তাধীনে এই বিস্তৃতি সম্ভব? ফলন যদি (ক) অপর্যাবৃত্ত, (খ) পর্যাবৃত্ত হয়, তাহলে পাল্লার বাইরে মূল ফলন এবং তার ফুরিয়ার-বিস্তৃতির মধ্যে সম্পর্ক কি হবে? ফুরিয়ার-সহগগুলি কি-ভাবে বার করবে?

যুগ্ম এবং অযুগ্ম ফলন কাকে কাকে বলে? কোন্ কোন্ ক্ষেত্রে বিস্তৃতিতে কেবল কোসাইন পদশ্রেণী থাকে আর কোন্ ক্ষেত্রেই বা কেবল সাইন পদশ্রেণী এবং কেন? বিস্তৃতিমাত্রেই কি দুই শ্রেণীর একটির অন্তর্গত হবেই? উদাহরণ দাও।

৬। $x=0$ থেকে $x=\pi$ পর্যন্ত $y=f(x)=a$ এবং $x=\pi$ থেকে $x=2\pi$ পর্যন্ত, $-a$ মান হলে ফুরিয়ার-বিস্তৃতি কি হবে?

[উঃ $(4a/\pi)(\sin x+\frac{1}{3}\sin 3x+\frac{1}{5}\sin 5x)$]

$y=f(x)=x^2$ হলে, অর্ধপাল্লায় ($x=0$ থেকে $x=l$ পর্যন্ত) কোসাইন পদশ্রেণী বার কর।

$$\left[\text{উঃ}\quad \tfrac{1}{3}l^2-\frac{4l^2}{\pi^2}\left(\cos\frac{\pi x}{l}-\frac{1}{2^2}\cos\frac{2\pi x}{l}+\frac{1}{3^2}\cos\frac{3\pi x}{l}\right)\right]$$

৭। তরঙ্গদল কাকে বলে? দলবেগ এবং দশাবেগের মধ্যে তফাৎ কি? দলবেগের ব্যঞ্জক বার কর। কোন্ কোন্ ক্ষেত্রে দলবেগ দশাবেগের চেয়ে বেশী বা কম?

১১
শব্দতরঙ্গের উপরিপাতন
(Superposition of Sound Waves)

১১-১. উপরিপাতন নীতি :

দুটি সরল দোলনের উপরিপাতন হলে কি হয়, তা আমরা দেখলাম। এখন কোন মাধ্যমে দুই তরঙ্গমালার উপরিপাতন হলে কি হয়, তা দেখব। আলোর একাধিক তরঙ্গমালার উপরিপাতন ব্যাখ্যা করতে গিয়ে ইংরেজ চিকিৎসক এবং বিজ্ঞানী ইয়ং **উপরিপাতন-নীতির** অবতারণা করেন—**মাধ্যমের কোন বিন্দুতে স্বল্প-সরণ একাধিক তরঙ্গমালা এসে পড়লে, সেই বিন্দুতে লব্ধি-সরণ স্বতন্ত্র সরণগুলির সদিশ্ যোগফলের সমান হয়।**

যেসব স্পন্দকের আচরণ রৈখিক (অর্থাৎ তাদের স্পন্দন সরল দোলগতি) কেবলমাত্র তাদের বেলাতেই এই নীতি প্রযোজ্য। স্পন্দন রেখাধর্মী হলে, (১) কণার বিস্তার সামান্য হবে, (২) ভিন্ন ভিন্ন তরঙ্গজনিত পরবশ কম্পন পরস্পর নিরপেক্ষভাবে কণাকে বিচলিত করবে, (৩) উপরিপাতন-অঞ্চল অতিক্রম ক'রে গেলে পর, তরঙ্গ-দুটির সব প্রাচলই অক্ষুণ্ণ থাকবে। রৈখিক স্পন্দনের প্রতিরূপ, একমাত্রিক অবকল সমীকরণ ; উপরোক্ত আচরণগুলি এই সমীকরণের সমাধানের **দুটি বৈশিষ্ট্যের** ওপর নির্ভর করে—

(ক) বিষমসত্ত্ব একমাত্রিক অবকল সমীকরণের বিষম অংশটি কয়েকটি রাশির যোগফল হলে, তার সমাধান ভিন্ন ভিন্ন অংশগুলি নিয়ে গঠিত স্বতন্ত্র সমীকরণগুলির সমাধানের সমষ্টি হবে। যেমন $f(t)=A_1 \cos \omega_1 t+A_2 \cos \omega_2 t+\cdots$ হলে, স্বতন্ত্র সমীকরণগুলি হবে $\ddot{x}_1+2b\dot{x}_1+\omega^2 x_1 =A_1 \cos \omega_1 t,\ \ddot{x}_2+2b\dot{x}_2+\omega^2 x_2=A_2 \cos \omega_2 t, \cdots$ এবং লব্ধ সমাধান হবে এদের সমাধানের সমষ্টি।

(খ) একমাত্রিক আংশিক অবকল সমীকরণের একাধিক স্বতন্ত্র সমাধান থাকলে, তাদের যেকোন রৈখিক সমষ্টিও ঐ সমীকরণের একটা সমাধান। ব্যাপারটা গতিবিদ্যায় সুপরিচিত, গতির ভৌত স্বাতন্ত্র্য (physical independence of motions) নীতিরই একটা উদাহরণ মাত্র—সচল

কণার ওপর একাধিক গতি আরোপিত হলে, একটির দরুন গতি অন্যের দ্বারা ক্ষুণ্ণ হয় না ; আপেক্ষিক গতি তার পরিচিত উদাহরণ।

শব্দ এবং আলোর বেলায় দুই উৎস বা একই উৎসজাত দুই ভিন্ন-পন্থা তরঙ্গমালার উপরিপাতনে অনেক গুরুত্বপূর্ণ ঘটনাই ঘটে। শাব্দ তরঙ্গমালার উপরিপাতনের আলোচনায় আমরা ইয়ং-নীতি প্রয়োগ ক'রবো। যদিও কেবলমাত্র অত্যণু-সরণের বেলাতেই এই নীতি নির্ভুলভাবে প্রযোজ্য, তবুও সাধারণ শব্দ-তরঙ্গের বেলায় এর প্রয়োগে উদ্ভূত ত্রুটি নগণ্যই। অনুল্লিখিত থাকলেও পর্যাবৃত্ত গতির সংশ্লেষ এবং ফুরিয়ার-উপপাদ্যের প্রয়োগে এই নীতির প্রয়োগ ইতিমধ্যেই করা হয়েছে। উপরিপাতন হলেও তরঙ্গপ্রাচলগুলি যে অক্ষুণ্ণ রয়ে যায়, তার প্রমাণ—(ক) একই ফুটোর মধ্যে দিয়ে ভিন্ন ভিন্ন জিনিস পরিষ্কার দেখা যায়, (খ) দুজনে একসঙ্গে কথা বললে, একের কণ্ঠস্বর অন্যের স্বরের দরুন বদ্‌লে যায় না।

তরঙ্গের গতিমুখ, কম্পাংক বা বিস্তার (স্বল্পমান হলে) নির্বিশেষে এই নীতি প্রযোজ্য ; তবে (১) সমান বা প্রায় সমান বিস্তার বা কম্পাংকের ক্ষেত্রে এবং (২) দুই তরঙ্গের ব্যাপ্তিপথ একই রেখায় বা স্বল্প কোণে আনত থাকলেই এই নীতির বাস্তবক্ষেত্রে প্রয়োগ সম্ভব। তিনটি সেইরকম গুরুত্বপূর্ণ ঘটনা শাব্দ তরঙ্গের বেলায় হয়—

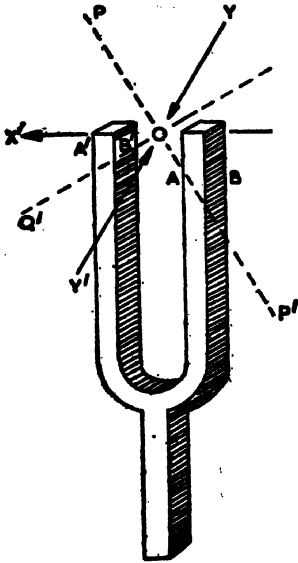
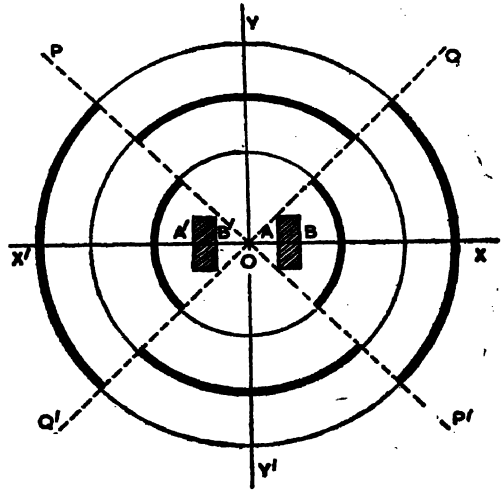
ক. **স্থাণুতরঙ্গ ঃ** দুই অভিন্নবিস্তার ও কম্পাংকের তরঙ্গমালা একই রেখা ধ'রে বিপরীতমুখে চললে এর উৎপত্তি হয়। আগেই ৫-১৩ অনুচ্ছেদে এরা আলোচিত হয়েছে।

খ. **ব্যতিচার ঃ** অভিন্ন কম্পাংক এবং বিস্তারের দুই তরঙ্গমালা একই দিকে চ'লে যদি উপরিপাতিত হয় তাহলে ব্যতিচার ঘটে। পথ-দুটি স্বল্পকোণে আনতও থাকতে পারে।

গ. **স্বরকম্প ঃ** এক্ষেত্রে দুই তরঙ্গমালা একই রেখায় একই দিকে চলবে। তাদের কম্পাংকে সামান্য তফাৎ থাকবে ; বিস্তার সমান হলেই ভালো, তবে সামান্য প্রভেদ থাকলেও চলবে।

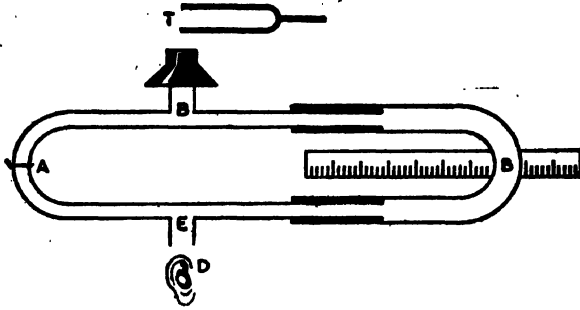
১১-২. শাব্দ ব্যতিচার ঃ ক. পরীক্ষা ঃ

(১) একটি স্পন্দনশীল সুরশলাকার দণ্ড হাতে ধ'রে কান থেকে কিছুটা দূরে রেখে খাড়া অক্ষ-সাপেক্ষে ধীরে ধীরে ঘোরাতে থাকলে (11.1a চিত্র)

এবং এক কান দিয়ে শুনলে, একবার আবর্তনের মধ্যে চারবার নীরবতা পাওয়া যাবে।

চিত্র 11.1(a) স্বরশলাকার স্পন্দনে ব্যতিচার চিত্র 11.1(b)

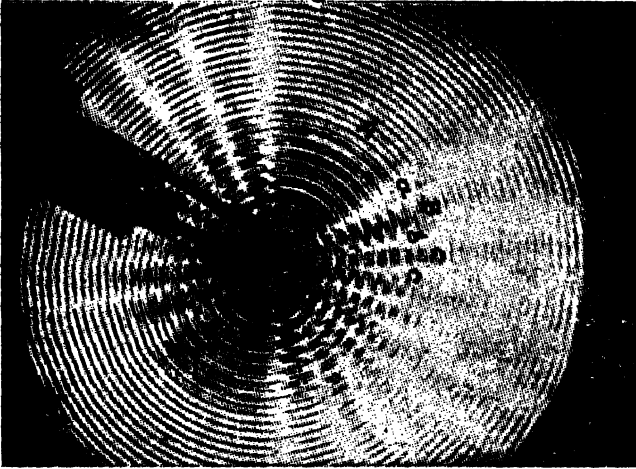
স্পন্দনশীল সুরশলাকার দুই বাহু AB এবং $A'B'$ একযোগে, হয় ভেতরের দিকে, না হয় বাইরের দিকে যায়। ধরা যাক, কোন এক মুহূর্তে তারা OX এবং OX' বরাবর বাইরের দিকে যাচ্ছে; তাহলে B এবং A' তল থেকে ঘনীভবন সৃষ্টি হচ্ছে, আর একই সঙ্গে A এবং B' তল থেকে তনুভবন সৃষ্টি হচ্ছে। তারা যথাক্রমে X এবং Y অক্ষ বরাবর গোলীয় তরঙ্গের (11.1b চিত্র) আকারে ছড়িয়ে পড়ছে ; ছবিতে মোটা রেখা দিয়ে ঘনীভবন আর পাতলা রেখা দিয়ে তনুভবন তরঙ্গ-পথ দেখানো হয়েছে। গোলীয় তরঙ্গগুলি XOX' এবং YOY' অক্ষ-দুইয়ের সমদ্বিখণ্ডক PP' এবং QQ' তল বরাবর উপরিপাতিত হবে। সমবিস্তার ঘনীভবন ও তনুভবন এই তলগুলি বরাবর উপরিপাতিত হতে থাকায়, নীরবতা ঘটবে এবং এই লাইনগুলিতে শ্রোতার কান থাকলে, তিনি কিছুই শুনবেন না। সুরশলাকাটিকে খাড়াভাবে ধ'রে ঘোরাতে থাকলে 11.1(b) চিত্রের নক্সাটিও ঘুরতে থাকবে এবং নীরবতা-রেখা OP, OQ, OP', OQ' পরপর কান বরাবর আসবে।

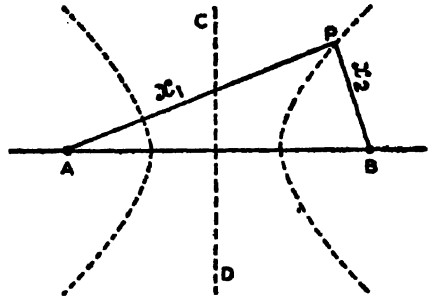
(২) Quincke-নল : BAE একটি U-নল, তাতে দুটি ফানেলের আকারের পার্শ্বনল থাকে ; এটি আর-একটি মোটা U-নল, $BB'E$-র মধ্যে এগোতে-পেছোতে পারে। A পাত ঠেলে দিয়ে BAE-কে দুই অংশে ভাগ করা যায়। B পার্শ্বনলের মুখে স্বনক T, E-র মুখে গ্রাহক D রাখা হয়।

B-তে শব্দতরঙ্গ দু'ভাগ হয়ে BAE ও $BB'ED$ পথে চলে যায় এবং পরে আবার E বিন্দুতে পুনর্মিলিত হয়। E বিন্দুতে পৌঁছতে দুই তরঙ্গ কত কত পথ অতিক্রম করেছে তার ওপরেই নির্ভর করে তারা কী দশায় মিলবে।

চিত্র 11.2—Quincke-নল

$BB'E$ অংশকে এগিয়ে-পেছিয়ে $BB'ED$ পথ ছোট-বড় করা যায়। কোন এক দৈর্ঘ্যের জন্য যদি নীরবতা পাওয়া যায়, তাহলে বুঝতে হবে যে দুই তরঙ্গ বিপরীত দশায় মিলেছে। দেখা যাবে যে, এই পথ যদি $\lambda/2$ পরিমাণ বাড়ানো হয়, তবে শব্দ খুব জোর হবে। পথ আরও এইরকম $\lambda/2$ বাড়ালে আবার নীরবতা পাওয়া যাবে। ঘটনাটা কতকটা স্থাণু তরঙ্গে ক্রমিক নিস্পন্দ আর সুস্পন্দ-বিন্দুর মতো দাঁড়াচ্ছে। যখন নীরবতা পাওয়া গেল তখন A পাত ঠেলে BAE পথ বন্ধ ক'রে দিলে, D-এ সাড়া মিলবে, আর টেনে নিলে নীরবতা পাওয়া যাবে, অর্থাৎ দুই তরঙ্গমালা পরস্পরকে প্রশমিত করছে, ব্যতিচার হচ্ছে।

খ. দশাভেদ এবং ব্যতিচার : মাধ্যমের কোন বিন্দুতে সমকম্পাংক ও সমবিস্তার তরঙ্গমালার উপরিপাতন হলে, তার বিচলন ওদের দশাভেদের ওপর নির্ভর করে। দুই তরঙ্গ সমদশায় মিললে, কণা-সরণ একই দিকে হওয়ায় লব্ধি-সরণ একটি-তরঙ্গবিস্তারের দ্বিগুণ আর বিপরীত দশায় মিললে, কণা-সরণ শূন্য (অর্থাৎ নিস্তরঙ্গ অবস্থা) হবে। 11.3 চিত্রে পারদতলে ব্যতিচারের আলোকচিত্র দেখানো হয়েছে। একটি সুরশলাকার দুই বাহুতে দুই কাঁটা লাগিয়ে

তাদের সাহায্যে একযোগে পারদতলে দুই লহরীমালা উৎপন্ন করা হয় ; ছবিতে দেখা যাচ্ছে : $a, b, c, \cdots$ প্রভৃতি জায়গাগুলি নিস্তরঙ্গ, আর $A, B, C, \cdots$ জায়গাগুলি চরম বিচলিত।

চিত্র 11.3—পারদতলে ব্যতিচার

কোন বিন্দুতে উপরিপাতিত দুই তরঙ্গমালার মধ্যে দশাভেদ তাদের অতিক্রান্ত পথবৈষম্যের ওপর নির্ভর করে। দুই উৎস A এবং B (চিত্র 11.4) থেকে ঐ বিন্দু P-র দূরত্ব যথাক্রমে x_1 এবং x_2 হলে, তাদের প্রতিটির জন্য বিচলন যথাক্রমে

$$\xi_1 = a \cos \beta (ct - x_1)$$

এবং $\xi_2 = a \cos \beta (ct - x_2)$

চিত্র 11.4—পথবৈষম্যজাত দশাভেদ

সুতরাং দশাভেদ $\phi = \beta (x_2 - x_1)$ (১১-২.১)

এবং সদিশ্ যোগের ফলে মোট সরণবিস্তার

$$A^2 = a^2 + a^2 + 2a^2 \cos \beta (x_2 - x_1)$$

$$= 2a^2 \left[1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1)\right] \quad (১১\text{-}২.২)$$

এখন 11.4 চিত্র থেকে পথবৈষম্য

$$AP-BP=(x_1-x_2)=(2m+1)\frac{\lambda}{2} \qquad (১১\text{-}২.৩ক)$$

হলে, $\cos\frac{2\pi}{\lambda}(x_1-x_2)=\cos(2m+1)\pi=-1$ এবং $A^2=0$

হবে। সুতরাং **পথবৈষম্য অর্ধতরঙ্গের অযুগ্ম গুণিতক হলে, তরঙ্গেরা বিপরীত দশায় মেলে** এবং নিস্তরঙ্গ অঞ্চল সৃষ্টি করে। আবার

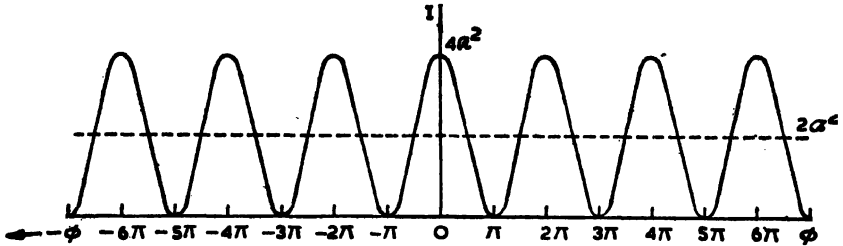
$x_2-x_1=2m\ \frac{1}{2}\lambda$ হলে,

$$\cos\frac{2\pi}{\lambda}(x_1-x_2)=\cos m\pi=1 \text{ এবং } A^2=4a^2 \qquad (১১\text{-}২.৩খ)$$

হয়। অর্থাৎ **পথবৈষম্য অর্ধতরঙ্গদৈর্ঘ্যের যুগ্মগুণিতক হলে, তরঙ্গদ্বয় সমদশায় মিলে** বিস্তার দ্বিগুণিত করে।

পথবৈষম্যের এই দুই সমীকরণ দুই আবর্তন-পরাবৃত্তক (hyperboloid of revolution) চিহ্নিত করে—AB তাদের অক্ষ, CD নিয়ামক এবং A, B দুই নাভি। সুতরাং নিস্তরঙ্গ বা সুস্পন্দ অঞ্চলগুলি পরাবৃত্ত বরাবর হবে। 11.4 চিত্রে ভাঙা-ভাঙা রেখা বরাবর নিস্পন্দ বিন্দুগুলির অবস্থান (locus) দেখানো হয়েছে; আগের আলোকচিত্রেও তা স্পষ্ট।

শাব্দ-তীব্রতা বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক। সুতরাং নিস্পন্দ বা নিস্তরঙ্গ অঞ্চলগুলি নীরব থাকবে আর সুস্পন্দ বিন্দুগুলি চরমমাত্রায় সরব হবে। **দুই অভিন্ন তরঙ্গমালার সমকালীন ক্রিয়ায় স্থাণু, সরব ও নীরব মণ্ডলীর একান্তরী উৎপত্তিই, শাব্দ ব্যতিচার।** এর ফলে শক্তির লয় হয় না, পুনর্বিন্যাস হয়; নীরব অঞ্চলের শক্তি সরে গিয়ে সরব অঞ্চলে জমে। 11.5 চিত্রে $a^2-\phi$ লেখ আঁকা হয়েছে। $x_2-x_1=0$ অর্থাৎ অতিক্রান্ত পথ ($AP=BP$) সমান হলে, দশাভেদ $\phi=0$ হয়। কোন বিন্দুতে লব্ধি-বিস্তারের বর্গ (a^2) সেই বিন্দুতে শাব্দ তীব্রতার মান নির্দেশ করে। সুতরাং 11.5 লেখটি ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে তীব্রতা নির্দেশ করছে; তীব্রতার চরম মান $4a^2$ এবং অবম মান শূন্য। এই লেখ মাধ্যমের বিক্ষুব্ধ অঞ্চলে শক্তির বণ্টনও নির্দেশ করছে। লেখের কোটির গড় মান $2a^2$ $[=\frac{1}{2}(4a^2+0)]$-এর সমান।

এখন ১১-২.২-কে $4a^2\cos^2\phi/2 = A^2$ আকারে লেখা যায়; এবং $\cos^2$-রাশির গড় মান ½ হওয়ায়, $A^2 = 2a^2$ হবে। এখন যেকোন

চিত্র 11·5—ব্যতিচারে তীব্রতা-বিন্যাস

বিন্দুতে তরঙ্গগুলির প্রতিটির জন্য শক্তির মান a^2-এর সমানুপাতিক, অর্থাৎ দুটির জন্য $2a^2$-এর সমানুপাতিক। অন্যভাবে দেখলে, সরববিন্দুতে শাব্দতীব্রতা (৬-৬.৩ থেকে)

$$I = 2\pi^2 \xi_m^2 n^2 \rho_0 c = 2\pi^2 .\ 4a^2 n^2 \rho_0 c$$

এবং নীরববিন্দুতে শূন্য। তাহলে গড় মান হচ্ছে $4\pi^2 a^2 n^2 \rho_0 c$; আবার ব্যতিচার না হলে, দু'জায়গায় শক্তি সমান এবং তার মান $2 \times 2\pi^2 n^2 a^2 \rho_0 c$ —আগের সমানই পাওয়া যাচ্ছে।

গ. ব্যতিচারে পালনীয় সর্ত: মাধ্যমের কোন বিন্দুতে দুই তরঙ্গাঘাতে উৎপন্ন **অখণ্ডিত স্তব্ধতা** বজায় রাখতে নিচের সর্তগুলি পালিত হওয়া চাই—

(১) দুই তরঙ্গের কম্পাংক তথা তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং বিস্তার সমান হতে হবে;

(২) তাদের ক্রিয়ায় কণা-সরণ একই সরলরেখা বরাবর হতে হবে;

(৩) ঐ বিন্দুতে আগন্তুক দুই তরঙ্গমালা সর্বদাই বিপরীত দশায় পৌঁছতে থাকবে;

(৪) দুই তরঙ্গমালা সমজাতি হতে হবে।

দুই আলাদা স্বনক থেকে উৎপন্ন দুটি শব্দতরঙ্গ প্রথম দুটি সর্ত পূর্ণ করতে পারে কিন্তু তৃতীয়টি পূর্ণ করা কঠিন। কারণ কোন স্পন্দকই অক্ষুণ্ণ দশায় এক-টানা কম্পিত হতে পারে না; হঠাৎ হঠাৎ তার কম্পনদশা বদলায়ই। আলোক-উৎসে এই ঘটনা আরও প্রকট হয়। ফলে স্বনক এক একটা সীমিত তরঙ্গদল

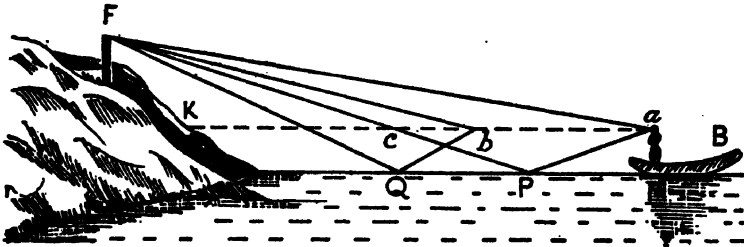
বিকিরণ করে, পরের তরঙ্গদলের সঙ্গে আগেরটির দশাসম্পর্ক অনিশ্চিত; সুতরাং দুই স্বনকে উৎপন্ন তরঙ্গমালার মধ্যে দশাভেদ স্থিরমান থাকে না; সেইরকম দুই স্বনককে অসংসক্ত বলে। **যদি দুই স্বনকের মধ্যে দশাভেদ সময়ের সঙ্গে কখনই না বদলায়, বা সদাই শূন্য থাকে, তবে তাদের সংসক্ত উৎস বলে।** ওপরের তালিকায় তৃতীয় সর্ত পালিত হতে হলে স্বনক-দুটিকে সংসক্ত (coherent) হতে হবে। আলো বা শব্দের ক্ষেত্রে একই উৎস থেকে উৎপন্ন তরঙ্গমালাকে দু'ভাগ ক'রে, দুই ভিন্ন পথে চালিয়ে প্রয়োজনীয় পথবৈষম্যের ব্যবস্থা ক'রে মাধ্যমের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে বিপরীত দশায় পুনর্মিলিত করা হয়। ব্যতিচারের পালনীয় চারটি সর্তই তখন পূর্ণ।

ব্যতিচারের পূর্ববর্ণিত দুই পরীক্ষাতেই সর্তগুলি পালিত হয়। সুরশলাকার বাহু দুটি একযোগে বাইরে যায় বা ভেতরে আসে, সুতরাং দুই স্বনকের স্পন্দন সমদশা; তাদের কম্পাংক এবং বিস্তার সমান এবং স্পন্দন সমরেখ। সুতরাং দুই তরঙ্গের বিস্তার এবং কম্পাংক সমান, আদিতে স্পন্দন সমদশা, কণাবিচলন সমরেখ। Quincke-এর পরীক্ষায় B বিন্দুতে একটি তরঙ্গমালাকে ভেঙে একই রেখা বরাবর বিপরীতমুখী দুই তরঙ্গমালায় পরিণত করা হয়। সুতরাং তাদের বিস্তার ও কম্পাংক সমান, স্পন্দন সমরেখ এবং B বিন্দুতে সমদশা। স্বনকের স্পন্দনদশার কোন অদলবদল হলে, B বিন্দুতেই দুই তরঙ্গে সেই পরিবর্তন সমানভাবে হস্তান্তরিত হয়, অর্থাৎ তাদের মধ্যে দশাভেদ অক্ষুণ্ণ থাকে। দুই পথের মধ্যে বৈষম্যই E বিন্দুতে তাদের মধ্যে বিপরীত দশা ঘটায়। উৎস, দুটিতেই সংসক্ত, তাই তরঙ্গেরা সমজাতি।

১১-৩. প্রত্যক্ষ ও প্রতিফলিত শব্দতরঙ্গের মধ্যে ব্যতিচার:

দুই তরঙ্গমালার মধ্যে ব্যতিচার ঘটাতে সংসক্ত উৎস দরকার। কোন সমতলে তরঙ্গমালার একাংশের প্রতিফলন ঘটিয়ে সহজেই সে-ব্যবস্থা হয়। প্রতিফলনে উৎপন্ন অলীক প্রতিবিম্বই তখন দ্বিতীয় সংসক্ত উৎসের কাজ করে। সুতরাং প্রত্যক্ষ ও প্রতিফলিত তরঙ্গমালার আপতনে ব্যতিচার ঘটবে। শব্দতরঙ্গের প্রতিফলন লম্ব আপতন এবং তির্যক্ আপতন—দুই কারণেই হতে পারে। প্রথম ঘটনায় স্থাণু তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। দ্বিতীয় ঘটনাটিকে লয়েড-দর্পণে আলোর প্রায় সমকোণে আপতনের ফলে যে উজ্জ্বল এবং অনুজ্জ্বল ব্যতিচার-পটির উৎপত্তি হয়, তাদের সগোত্র বলা যায়।

ক. লম্ব আপতন : দৃঢ় বা নমনীয় বাধা থেকে লম্ব বরাবর প্রতিফলনে স্থাণু তরঙ্গের (§৫-১২ ও ৫-১৩) উৎপত্তি হয়। ব্যতিচারের আলোচনায় এটিই সর্বাধিক গুরুত্বপূর্ণ ঘটনা। বিভিন্ন সর্তাধীনে প্রত্যক্ষ ও প্রতিফলিত তরঙ্গের প্রতিফলনের গাণিতীয় বিশ্লেষণ §৯-৪-এ করা হয়েছে। তারের অনুপ্রস্থ এবং বায়ুস্তম্ভ ও দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য কম্পনের আলোচনায় এর আবার দরকার হবে। তা ছাড়া, পরীক্ষাগারে শব্দের বেগ নির্ণয়ের Hebb-উদ্ভাবিত সুবেদী পন্থা (§২১-৩ক) আর Kundt-নলে শব্দতরঙ্গ-নির্ণয়ের সুবেদী পন্থার (§২১-৪খ) ভিত্তিও এই ঘটনা।

খ. তির্যক্ প্রতিফলন-জাত ব্যতিচার : কতকগুলি দৈনন্দিন ঘটনা থেকে এই ব্যাপারে অভিজ্ঞতা হয়। ঠাণ্ডার দেশে সমুদ্রের ওপর ঘন কুয়াশা জমে। তাই নৌ-চলাচলে হুঁসিয়ারি দেওয়ার জন্যে জলের ধারে উঁচু

চিত্র 11.6—Fog-সাইরেন-সৃষ্ট ব্যতিচার

জায়গায় কুয়াশা-সাইরেন (11.6 চিত্রে F) বাজে। সেই দিকে কোন নৌকা এগোতে থাকলে, নাবিক এক এক ক'রে প্রবলরকম সরব এবং প্রায়-নীরব অঞ্চল অতিক্রম করতে থাকে। তার কাছে Fa বরাবর সরাসরি একটি তরঙ্গমালা এবং FPa পথে প্রতিফলিত তরঙ্গমালা এসে পৌঁছয়। $(FPa - Fa)$ পথভেদ যদি $(2m+1)\lambda/2$ হয়, তবে a বিন্দু নীরব হবে। তেমনি b বিন্দুতে $(FQb - Fb)$ অর্ধতরঙ্গদৈর্ঘ্যের অযুগ্ম গুণিতক, সুতরাং নৌকা সেখানে এলেও কোন শব্দ পাবে না ; c বিন্দুতে একই ব্যাপার ঘটবে। ab-র বা bc-র মধ্যবিন্দুতে প্রত্যক্ষ ও পরোক্ষ পথভেদ $2m.\lambda/2$ হবে, অর্থাৎ শব্দ খুব জোরালো হবে। কুয়াশা-সাইরেনের শব্দের একটিই কম্পাংক ; এখানে একান্তরী সরব অঞ্চল ও নীরব অঞ্চলের উৎপত্তি, আলোর ব্যতিচারে

একরঙা আলোয় লয়েড-দর্পণ-পরীক্ষায় উৎপন্ন একান্তরী উজ্জ্বল ও অনুজ্জ্বল আলোকপটির সগোত্রীয় ঘটনা।

যদি ঋজু, মসৃণ পিচ-বাঁধানো রাস্তার সমান্তরালে একটি বিমান উড়ে আসে, তাহলে স্থাণু শ্রোতা একবার জোরালো আর একবার মৃদু শব্দ শুনবেন এবং দু'ক্ষেত্রে শব্দের স্বনজাতি ভিন্ন হবে। বিমানের শব্দে বহু কম্পাংক থাকে; প্রত্যক্ষ ও প্রতিফলিত শব্দ অতিক্রান্ত একই পথভেদে কিছু কিছু কম্পাংকের শব্দ বিপরীত দশায় পৌঁছয় এবং প্রশমিত হয়ে যায়; কিন্তু অন্য কিছু কম্পাংকের তরঙ্গের মধ্যে দশাভেদের মান অন্য, তাদের জোর কমে বটে কিন্তু প্রশমিত হয় না। তাই শব্দের জোর এবং জাতি দুইই বদলায়। ঐরকম রাস্তা ধ'রে কেউ যদি জলপ্রপাতের দিকে এগোতে থাকেন, তাঁদের বেলাতেও অনুরূপ ঘটনা ঘটে। দুই ক্ষেত্রে ব্যতিচারের ব্যাপার অভিন্ন; কেবল প্রথমটিতে স্বনক সচল, দ্বিতীয়টিতে শ্রোতা। লয়েড-দর্পণে সাদা আলো ফেললে ব্যতিচার-পটির রঙ কেন্দ্রবিন্দু থেকে এগোলে কেবলই বদলাতে থাকে; সাদা রঙে তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনেকগুলি, আর ভিন্ন ভিন্ন রঙগুলিকে ভিন্ন ভিন্ন আলোক-জাতি ব'লে ধরা যায়।

সমুদ্রপৃষ্ঠে জাহাজ, শব্দ-সন্ধানী হাইড্রোফোন (§১৫-১৭) যন্ত্রে ডুবো-জাহাজের সাড়া পায় এবং তার অবস্থান নির্ণয় করতে পারে। জল থেকে বায়ুতে প্রতিফলনে শাব্দ বাধের অনেক তফাৎ থাকে এবং ঘনতর থেকে লঘুতর মাধ্যমে আপতনের ফলে শব্দতরঙ্গ বিপরীত দশায় ও প্রায় সমবিস্তারে প্রতিফলিত হয়। ফলে, জলপৃষ্ঠের ঠিক নীচেই প্রথম শব্দলাঘব বা নীরববিন্দুর উৎপত্তি হয়। কাজেই হাইড্রোফোনের অবস্থান যদি জলের ঠিক তলাতেই হয় তাহলে ডুবোজাহাজের সাড়া ধরাই যাবে না। ব্যাপারটি লয়েড-দর্পণে কেন্দ্রবিন্দুটি (যেখানে পথভেদ শূন্য) অনুজ্জ্বল হওয়ার ঘটনার মতো।

বিমান যদি খুব নীচু দিয়ে উড়ে যায় তবে একই কারণে রাডার-যন্ত্রে তার সন্ধান করা যায় না।

১১-৪. স্বরকম্প:

কাছাকাছি কম্পাংকের এবং প্রাবল্যের দুই শব্দ একসঙ্গে হতে থাকলে, মাধ্যমের কোন এক বিন্দুতে লব্ধিপ্রাবল্য পর্যায়ক্রমে বাড়ে এবং কমে।

উপরিপাতিত শব্দের এই ওঠা-নামাকে স্বরকম্প বলে। শব্দের একবার বাড়া আর একবার কমা নিয়ে একটি স্বরকম্প হয়।

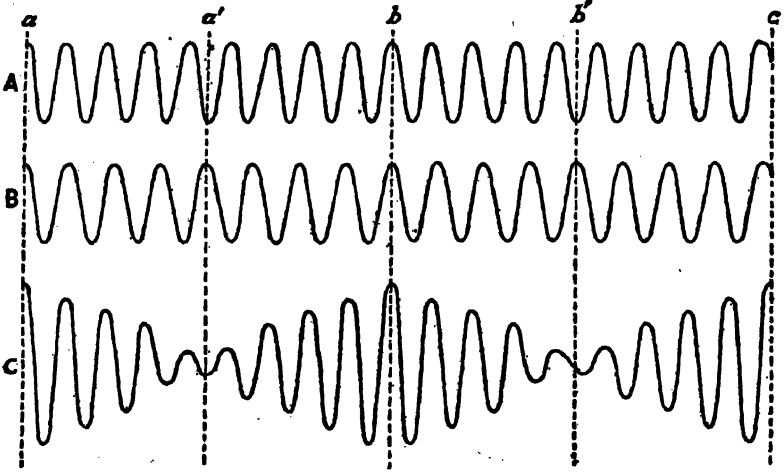
হারমোনিয়মের একেবারে বাঁয়ের দুটি রীড চেপে ধরে বাজালে, স্বরকম্প শোনা যায়। দুই সমকম্পাংকের সুরশলাকা নিয়ে তাদের একটির যেকোন বাহুর প্রান্তে এক ফোঁটা মোম বা গালা ফেলে বা খুব সরু দু'-এক পাক তার জড়িয়ে দুটিকে বাজালে স্বরকম্প শোনা যায়। সমান সাইজের দুটি শাঁখ একসঙ্গে বাজালে সময়ে সময়ে এদের শোনা যায়।

ক. উৎপত্তি ঃ ২৫৬ এবং ২৬০ কম্পাংকের দুটি সুরশলাকা একসঙ্গে বাজলে, সিকি সেকেণ্ডে ৬৪ এবং ৬৫টি পূর্ণতরঙ্গের সৃষ্টি হচ্ছে। যদি কোন নিমেষে দুই তরঙ্গের দরুন দুই ঘনীভবন কানে পৌঁছয়, তাহলে শাব্দচাপ সমমুখী হয়ে কানের পর্দার বিচলন দ্বিগুণ করবে এবং প্রবল শব্দ শোনা যাবে। সেই মুহূর্তের ১/৪ সেকেণ্ড পরে ৬৪তম এবং ৬৫তম ঘনীভবন একযোগে পর্দায় পৌঁছে শব্দ আবার জোরালো করবে। এর ১/৮ সেকেণ্ড পরে ৩২তম এবং ৩২½তম তরঙ্গ, অর্থাৎ একটির দরুন ঘনীভবন আর অপরটির দরুন তনুভবন কানের পর্দায় পৌঁছে প্রশমন ঘটায়, ফলে শব্দ থাকে না। আরও ১/৮ সেকেণ্ড পরে আবার দুই ঘনীভবন একযোগে কানে পৌঁছে শব্দ জোরালো করবে, কারণ দ্বিতীয় স্বনক একটি বাড়তি তরঙ্গ পাঠিয়েছে। তাহলে ১/৪ সেকেণ্ড পরে পরে শব্দ জোর হবে আর তাদের মাঝামাঝি সময়ে প্রায় নৈঃশব্দ্য হবে। পরপর দুই চরম সরবতা বা নীরবতার মধ্যে কালান্তর ১/৪ সেকেণ্ড এবং পরপর সরবতা ও নীরবতার মধ্যে, ১/৮ সেকেণ্ড। সুতরাং এখানে স্বরকম্পের সংখ্যা এক সেকেণ্ডে চার—দুই জনক-কম্পাংকের অন্তর।

খ. সংখ্যা ঃ দুই স্বনকের কম্পাংক n এবং n' $(n' > n)$, উৎপন্ন দুই তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে λ এবং λ' $(\lambda' < \lambda)$ এবং দুয়েরই তরঙ্গবেগ c ধরা যাক। 11.7 চিত্রে a বিন্দুতে কোন-এক নিমেষে তারা সমদশায় পৌঁছেছে ; b বিন্দুতেও তারা সমদশা কিন্তু হ্রস্বতর তরঙ্গের সংখ্যা 1 বেশী। যদি ab দূরত্বের (l) মধ্যে দীর্ঘতর তরঙ্গের সংখ্যা m হয়, তাহলে স্পষ্টতই

$$l = m\lambda = (m+1)\lambda'. \quad \therefore \quad m = \lambda'/(\lambda - \lambda').$$

এখন দুই তরঙ্গের উপরিপাতনে উৎপন্ন চরম বা অবম বিস্তারও c বেগেই এগোবে। (ছবিতে Ab দূরত্বে ৯টি এবং Bb দূরত্বে ৮টি তরঙ্গ রয়েছে)।

কাজেই c দৈর্ঘ্যের মধ্যে যতগুলি চরম এবং অবম বিস্তারদশা থাকবে, তারাই এক সেকেণ্ডের মধ্যে একটি স্থির বিন্দু (বা শ্রোতাকে) অতিক্রম ক'রে যাবে।

চিত্র 11.7—স্বরকম্পের লেখচিত্র

এখন পরপর দুই চরম বা অবম দশার মধ্যে দূরত্ব l ; সুতরাং c দৈর্ঘ্যের মধ্যে তাদের সংখ্যা হবে

$$\frac{c}{l}=\frac{c}{m\lambda}=\frac{c}{\lambda}\cdot\frac{\lambda-\lambda'}{\lambda'}=\frac{c}{\lambda'}-\frac{c}{\lambda}=(n'-n) \quad (১১\text{-}৪.১)$$

অর্থাৎ এক সেকেণ্ডে স্বরকম্পের সংখ্যা দুই জনক-কম্পাংকের অন্তরফল

গ. লেখচিত্র : তরঙ্গগতির আলোচনা থেকেও স্বরকম্পের উৎপত্তি-বিচার সম্ভব। 11.7 চিত্রে দুই স্বনকের দরুন তরঙ্গের লেখীচিত্র দেখানো হয়েছে। তাদের কম্পাংক যথাক্রমে ১৬ এবং ১৮ হার্জ এবং কোন-এক নির্দিষ্ট নিমেষে তাদের নিজস্ব সরণগুলিকে যোগ ক'রে C বক্ররেখা দিয়ে চিহ্নিত করা হয়েছে। A, B, C—তরঙ্গচিত্র বা মাধ্যমের কণাগুলির দেশ-সরণ রেখা। 10.5 চিত্রে সমবিস্তার কিন্তু অল্প প্রভেদের কম্পাংকের দুই সরল দোলনের উপরিপাতনের কাল-সরণ রেখা দেখানো হয়েছিল। প্রথমটিতে এক মুহূর্তে মাধ্যমের ভিন্ন ভিন্ন কণার অবস্থান আর দ্বিতীয়টিতে

ভিন্ন ভিন্ন মুহূর্তে একটি কণার অবস্থান দেখানো হয়েছে। দুই-ই অভিন্ন। সচল শ্রোতার কানে শব্দের হ্রাসবৃদ্ধির সঠিক চিত্র 10.5 ; মনে রাখতে হবে যে সময়ের সঙ্গে C প্রতিরূপ, শব্দের বেগে এগোতে থাকবে ; সুতরাং 11.7 চিত্রকে সচল কল্পনা করলে, অচল শ্রোতার কানে শব্দের হ্রাসবৃদ্ধির ঘটনা বোঝা যাবে।

চিত্রে a বিন্দুতে দুই তরঙ্গ সমদশা, সুতরাং সরণ চরমমাত্রা। ডানে সরতে থাকলে, দশাভেদ বাড়তে বাড়তে a' বিন্দুতে π হয়, অর্থাৎ বিচলন শূন্য। আরও ডানে দশাভেদ বাড়তে বাড়তে b-তে 2π হয় ; তখন তরঙ্গ-দুটি সমদশায় মিলে বিচলন দ্বিগুণ করে। a ও b-র মধ্যে তরঙ্গসংখ্যার প্রভেদ 1 ; আরও এগোলে, b'-এ অবম সরণ এবং c-তে চরম সরণ হতে দেখি। অর্থাৎ যেখানে যেখানে উপরিপাতন হয়, সেখানে সেখানে পর্যায়ক্রমে চরম ও অবম সরণ দেখা যায়। এই প্রতিরূপ কিন্তু স্থির থাকে না, শব্দের বেগে এগোয়। ছবিতে এক সেকেণ্ডে অতিক্রান্ত দূরত্ব ac-র মধ্যে দু'জোড়া চরম ও অবম সরণদশা দেখা যাচ্ছে। প্রতি জোড়া একটি স্বরকম্প এবং তাদের সংখ্যা দুই কম্পাংকের অন্তরের সমান।

ঘ. স্বরকম্প ও শ্রুতি : স্বরকম্প পরিষ্কারভাবে শুনতে হলে তিনটি সর্ত পালিত হওয়া চাই :

(১) দুই স্বরের মধ্যে কম্পাংকভেদ অল্প হবে। তাদের তফাৎ সেকেণ্ডে 6 বা 7 পর্যন্ত থাকলে প্রাবল্যের হ্রাসবৃদ্ধি কানে খারাপ লাগে না। কম্পাংকভেদ যতই বাড়তে থাকে ততই হ্রাসবৃদ্ধির ছন্দ কানে কর্কশ এবং বেসুরো লাগতে থাকে। স্বরকম্পের সংখ্যা সেকেণ্ডে 30-এর মতো হলে, বেসুরো অনুভূতি চরমে পৌঁছয়। সংখ্যা আরও বাড়লে বেসুরো অনুভূতি কমতে থাকে, স্বরকম্প-সংখ্যা 60-এর মতো হলে শব্দ সুসঙ্গত লাগে।

স্বরকম্পের সংখ্যা 10-এর বেশী হলে হ্রাসবৃদ্ধি আলাদা ক'রে আর কানে ধরা পড়ে না, যদিও মাধ্যমে তাদের ভৌত উপস্থিতি ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখে খুব সহজেই দেখানো যায়। তবে শ্রুতিগোচর পাল্লায় স্বরকম্পকে নবগঠিত অন্তরস্বন (difference tone) বলা যায় না, সে কোন নতুন সুর নয়। স্বরকম্প হলে মাধ্যমে চাপ-পরিবর্তনের কম্পাংক, মৌল সুরের দরুন চাপ-পরিবর্তনের কম্পাংকেরই সমান। অন্য সুর হলে এই চাপভেদের কম্পাংক অন্য হ'ত।

(২) মৌল সুর-দুটির স্পন্দনবিস্তার সমানই, এপর্যন্ত আমরা ধরে এসেছি ; এই সর্তই বাঞ্ছনীয়—কারণ সুরতীব্রতা বিস্তারনির্ভর। দুই বিস্তার সমান

হলে প্রথম অবস্থায় নীরবতা ঘটবে এবং সরবতার সঙ্গে তার তফাৎ সহজগ্রাহ্য। তবে বিস্তারে অল্প প্রভেদ থাকলেও এই তফাৎ ধরা যাবে। কিন্তু বিস্তারে তফাৎ বেশী হলে দুর্বল সুরটি উপরিপাতিত হয়ে জোরালো সুরের বিশেষ পরিবর্তন ঘটাতে পারবে না, সুতরাং স্বরকম্প বা সুরের ওঠা-নামা কানে বিশেষ স্পষ্ট হবে না। কানে না পরিষ্কার হলেও দোলন-লিখে সেই ওঠা-নামা চক্ষুগোচর করা যাবে।

(৩) স্পষ্ট উপলব্ধি করতে শব্দ দুটি অভিন্ন স্বনজাতি হতে হবে, অর্থাৎ তাদের তরঙ্গরূপ বা তরঙ্গডৌল একরকমের হওয়া চাই।

১১-৫. স্বরকম্পের গাণিতীয় বিশ্লেষণ :

কোন রৈখিক স্পন্দকের ওপর একযোগে দুটি সরল দোলন প্রযুক্ত হলে স্বরকম্পের উৎপত্তি হয় ; ১০-৫ অনুচ্ছেদে সে আলোচনা করা হয়েছে। এই সংযুক্তি সরাসরি উপরিপাতন-নীতি-সম্মত ; এখানে স্পন্দনবিস্তার স্বল্পমাত্রা এবং স্পন্দকের একটি বলপ্রসূত দোলন অন্য বলের ক্রিয়ায় প্রভাবান্বিত হয় না। অবদমন নগণ্য ধরলে, এক্ষেত্রে স্পন্দনের সমীকরণ দাঁড়াবে

$$m\ddot{\xi}+s\xi=F\cos pt+G\cos qt$$

[p এবং q কৌণিক কম্পাংক ; তাদের মান $2\pi\nu_1$ ও $2\pi\nu_2$]

বা $$\ddot{\xi}+\omega^2\xi=f\cos pt+g\cos qt \qquad (১১-৫.১)$$

এটি পরবশ কম্পনের অবকল সমীকরণ। যেহেতু এইজাতীয় সমীকরণের সমাধান পরস্পর-নিরপেক্ষ (§১১-১ দেখ) হয়, সেইহেতু দুই বলের ক্রিয়ার বিক্ষুব্ধ কণার যৌথ সরণ হবে

$$\xi=a\cos(pt-\phi)+b\cos(qt-\phi')$$

$$=a\cos(pt-\beta x)+b\cos(qt-\beta' x) \qquad (১১-৫.২)$$

$$[\,\beta=2\pi/\lambda=\text{তরঙ্গধ্রুবক}\,]$$

$$=a\cos\tfrac{1}{2}[(p+q)t+(p-q)t-(\beta+\beta')x-(\beta-\beta')x]$$
$$+b\cos\tfrac{1}{2}[(p+q)t-(p-q)t-(\beta+\beta')x+(\beta-\beta')x]$$

$$=a\cos[(m+n)t-(c+d)x]$$
$$+b\cos[(m-n)t-(c-d)x]$$

$$=a\cos[(mt-cx)+(nt-dx)]$$
$$+b\cos[(mt-cx)-(nt-dx)]$$

$$= (a+b)\cos(mt-cx)\cos(nt-dx)$$
$$-(a-b)\sin(mt-cx)\sin(nt-dx) \quad (১১\text{-}৫.৩ক)$$
$$= C\cos(mt-cx)\cos\delta - C\sin(mt-cx)\sin\delta$$
$$= C\cos(mt-cx+\delta) \quad (১১\text{-}৫.৩খ)$$
$$= C\cos[\tfrac{1}{2}(p+q)t - \tfrac{1}{2}(\beta+\beta')x+\delta] \quad (১১\text{-}৫.৩গ)$$

এখানে $C^2 = C^2\cos^2\delta + C^2\sin^2\delta$

$$= [(a+b)^2\cos^2(nt-dx) + (a-b)^2\sin^2(nt-dx)]$$
$$= (a^2+b^2)\{\cos^2(nt-dx)+\sin^2(nt-dx)\}$$
$$+2ab\{\cos^2(nt-dx)-\sin^2(nt-dx)\}$$
$$= a^2+b^2+2ab\cos 2(nt-dx) \quad (১১\text{-}৫.৪)$$

এবং $\tan\delta = \dfrac{(a-b)\sin(nt-dx)}{(a+b)\cos(nt-dx)} = \dfrac{a-b}{a+b}\tan(nt-dx)$

$$= \frac{a-b}{a+b}\tan[\tfrac{1}{2}(p-q)t - \tfrac{1}{2}(\beta-\beta')x] \quad (১১\text{-}৫.৫)$$

যেহেতু C-র ব্যঞ্জকে আমরা $\sin(nt-dx)$ এবং $\cos(nt-dx)$ দুটি পদই পাচ্ছি, সেইহেতু তাতে দুটি সচল তরঙ্গগতি আছে, বুঝতে হবে। তাদের স্বকীয় গতিবেগ যথাক্রমে p/β এবং q/β'; সুতরাং উপরিপাতনে উৎপন্ন বিস্তারের বেগ $(p-q)/(\beta-\beta')$ হবে। ১১-৫.৩গ থেকে লব্ধি-তরঙ্গের কৌণিক কম্পাংক $\frac{1}{2}(p+q)$, তরঙ্গধ্রুবক $\frac{1}{2}(\beta+\beta')$ এবং বেগ $(p+q)/(\beta+\beta')$; ১১-৫.৪ এবং ১১-৫.৫ থেকে দেখি, এই তরঙ্গের সরণীবিস্তার C এবং দশাভেদ δ দুইই, সময়ের সঙ্গে বদলায়। p বা q-এর তুলনায় $(p-q)$ ছোট হলে, ১১-৫.৩গ থেকে বলা যায় যে উপরিপাতনে এমন এক সমঞ্জস তরঙ্গের সৃষ্টি হয়েছে যার কৌণিক কম্পাংক $\frac{1}{2}(p+q)$ কিন্তু কোন একটি বিন্দুতে বিস্তার C এবং দশাভেদ δ, সময়সাপেক্ষে $\frac{1}{2}(p-q)$ হারে সমঞ্জসভাবেই বদলাচ্ছে।

সেই নির্দিষ্ট বিন্দুকে $x=0$ ধরলে, লব্ধি-বিস্তারের নিমেষ-মান হবে

$$C = (a^2+b^2+2ab\cos 2nt)^{1/2} \quad (১১\text{-}৫.৬)$$

$\cos 2nt = 1$ হলে, বিস্তারের মান চরম হবে

$$C_{max} = (a+b) \quad (১১\text{-}৫.৬ক)$$

$\cos 2nt = -1$ হলে, লব্ধি-বিস্তারের মান অবম হবে

$$C_{min} = (a-b) \qquad (১১\text{-}৫.৬খ)$$

অর্থাৎ $2nt = 0, 2\pi, 4\pi$ ইত্যাদি হলে, বিস্তার চরম হবে এবং পরপর দুই চরম বিস্তারের মধ্যে কালান্তর হবে

$$T = \frac{2\pi}{2n} = \frac{2\pi}{(p-q)} = \frac{2\pi}{2\pi(\nu_1 - \nu_2)}$$

সুতরাং এক সেকেণ্ডে চরমবিস্তারের সংখ্যা হবে

$$N = 1/T = \nu_1 - \nu_2 \qquad (১১\text{-}৫.৭)$$

এখানে ν_1 এবং ν_2 দুই মৌল সুরের কম্পাংক, আর N হচ্ছে স্বরকম্পের সংখ্যা। অবম বিস্তার ঘটবে যখন $2nt = \pi, 3\pi, 5\pi, \cdots$ হবে ; তখনও স্বরকম্পের সংখ্যা একই হবে। কাজেই $x = 0$ বিন্দুতে সময় কাটার সঙ্গে সরণবিস্তার পর্যায়ক্রমে $(a+b)$ এবং $(a-b)$ মানের মধ্যে ওঠা-নামা করতে থাকে। তীব্রতা বিস্তারের বর্গানুপাতিক হওয়ায় ঐ বিন্দুতে শব্দের জোর পর্যায়ক্রমে বাড়ে-কমে। তরঙ্গগতির পথে যেকোন বিন্দুতেই $(x = x)$ এই ঘটনা ঘটবে। সুতরাং বলা যায় যে **শব্দের বেগে সচল ও সময়সাপেক্ষে পরিবর্তী সরণবিস্তারই স্বরকম্পের উৎপত্তির কারণ।** কাজেই স্বরকম্প, সচল ব্যতিচার-প্রতিকৃতি (pattern) ছাড়া আর কিছুই নয়।

১১-৬. স্বরকম্পের ব্যবহারিক প্রয়োগ :

(১) বাদ্যযন্ত্রে সুর-বাঁধার (tuning) কাজে স্বরকম্পের প্রয়োগ, বাদক-মাত্রেই ক'রে থাকেন। দুটি স্বনকের সুরকম্পাংক কাছাকাছি এলে স্বরকম্প শোনা যায়। এখন একটির কম্পাংক স্থির রেখে অন্যটি বদলাতে থাকলে স্বরকম্পের সংখ্যাও বদলায়। তাদের সংখ্যা কমতে কমতে যখন শূন্য হয় তখন সুর-বাঁধার কাজ শেষ, কেননা দুই স্বনকের কম্পাংক সমান হয়েছে।

(২) দুই স্বনকের কম্পাংক কাছাকাছি থাকলে স্বরকম্পের সংখ্যা তাদের কম্পাংকের অন্তরফল। যদি একটির কম্পাংক (ν_1) জানা থাকে তাহলে অপরটির কম্পাংক $\nu_1 \pm N$ হবে। অজানা স্বনকের ভর সামান্য বাড়ালে, N যদি বাড়ে তবে তার কম্পাংক কম $(\nu_1 - N)$, আর N যদি কমে তবে তার কম্পাংক $\nu_1 + N$; এইভাবে অজানা স্বনকের কম্পাংকের সঠিক মান, স্বরকম্প গুনেই বার করা যায়। পন্থাটি খুবই সহজ অথচ নির্ভুল।

(৩) পুলিশ-হুইশ্‌লের মতো দোনলা হুইশ্‌ল বাজিয়ে স্বরকম্পের উৎপত্তি ঘটলে খনিগর্ভে বিপজ্জনক গ্যাসের উপস্থিতি টের পাওয়া যায়। এর নল-দুটি ছোট এবং একেবারে অবিকল। তাদের একটিতে বিশুদ্ধ বায়ু থাকে, অপরটিতে খনিগর্ভের বায়ু ভরা হয়। দু'জায়গাতে বায়ুর উপাদান একরকম থাকলে নল-দুটির শব্দ সমকম্পাংক হবে। কিন্তু একটিতে দাহ্য গ্যাস থাকলে, তাতে বায়ুর ঘনত্ব কমে যায়। ফলে, শব্দের বেগ তথা কম্পাংক ($c = n\lambda$) বদলে যায়। তখন দুই নলের সুরে স্বরকম্প শোনা যায়। ডেভি-র নিরাপত্তা-বাতির তুলনায় এই পদ্ধতি অনেক সুবেদী ও নিরাপদ।

(৪) বেতার-গ্রাহক-যন্ত্রে সংকেতগ্রহণে ব্যবহৃত 'heterodyne' পদ্ধতিতে স্বরকম্পের ব্যবহার হয়। এতে স্বনোত্তর কম্পাংকের আগন্তুক বেতার-তরঙ্গের সঙ্গে, গ্রাহকযন্ত্রে উৎপন্ন আর এক স্বনোত্তর তরঙ্গ মিশিয়ে, পরিবর্তী বৈদ্যুতিক স্পন্দন উৎপন্ন করা হয়; তার কম্পাংক দুই মৌল কম্পাংকের অন্তরফলের সমান। এর ক্রিয়ায় লাউড-স্পীকারের পর্দায় স্পন্দন শ্রুতিগ্রাহ্য শব্দতরঙ্গ উৎপন্ন করে। এইজাতীয় heterodyne স্বরকম্প ব্যবহার ক'রে, অতি সামান্য সরণ মাপা গেছে—তাদের মধ্যে সামান্য ভার-প্রয়োগে ক্যান্টিলেভারের অত্যণু-নতি মাপা অন্যতম উদাহরণ।

১১-৭. উপরিপাতন নীতির ব্যর্থতা:

স্পন্দক-সংস্থার উপর বলের ক্রিয়ায় তার ততি এবং উৎপন্ন পীড়ন যদি সমানুপাতিক হয়, অর্থাৎ হুকের সূত্র মেনে চলে, তাহলে তাকে রৈখিক সংস্থা বলে। (ক) **রৈখিক সংস্থার ওপর প্রযুক্ত দোলনবিস্তার যদি (খ) স্বল্পমান হয়, তাহলেই উপরিপাতন নীতি প্রযোজ্য। তখন প্রযুক্ত ভিন্ন ভিন্ন বল-জনিত বিস্তারগুলি পরস্পর নিরপেক্ষ হয়।** দুটি সর্তের যেকোনটি লঙ্ঘিত হলে, উপরিপাতন নীতি আর প্রয়োগযোগ্য থাকে না। সংস্থার স্পন্দন তখন অরৈখিক; স্পন্দকের গঠন-বৈকল্য থাকলে বা প্রযুক্ত বলের বিস্তার বেশী হলে স্পন্দন অরৈখিক হয়ে পড়ে।* শব্দতরঙ্গের ক্ষেত্রে স্পন্দকের অরৈখিক আচরণ নতুন নতুন সুরের সৃষ্টি করতে পারে। তাদের মধ্যে আমরা **শ্রুতি-সমমেল** (aural harmonics) এবং **যুক্তস্বন** (combinational tones) এবারে আলোচনা ক'রবো।

---

* পূর্বে আলোচিত শক্‌-তরঙ্গের (§৭-৩) বা বিপুল-বিস্তার তরঙ্গের (§৭-২) সমাপতন এই নীতি মেনে চলে, কারণ এক্ষেত্রে তরঙ্গ-সমীকরণ দ্বিঘাত শ্রেণীর, রৈখিক নয়।

শ্রুতি-সমমেল: ওহ্‌মের মতে (§১৭-৪), আমাদের কানের পর্দা কেবলমাত্র সরল দোলনে সাড়া দিতে পারে, অর্থাৎ আপাতিত শব্দতরঙ্গের বিস্তার তথা তীব্রতা স্বল্পমান হলে, তবেই কানের পর্দার স্পন্দন রৈখিক হয়। কিন্তু প্রবল শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় পর্দার স্পন্দন আর রৈখিক থাকে না। তখন ওহ্‌ম সূত্র অচল এবং কোন জটিল ও প্রবল শব্দতরঙ্গ কানে এলে, আমরা এমন কম্পাংকের শব্দও শুনি, যার কিন্তু বাস্তবে কোন অস্তিত্ব নেই। এদের কম্পাংক মূল কম্পাংকের দ্বিগুণ, ত্রিগুণ ইত্যাদি হতে পারে।

সরল দোলনের ক্রিয়ায় রৈখিক স্পন্দকের বেগ-বিস্তার ৩-৬.৪ অনুসারে $v_m = f/Z_m = Yf$ হবে; এখানে Y যান্ত্রিক বাধের অন্যোন্যক এবং তাকে যান্ত্রিক প্রবেশিতা (admittance) বলা চলে। এইরকম দুটি বলের আচরণ উপরিপাতন নীতি মেনে চলবে। কিন্তু জোরালো দোলনে স্পন্দকের বেগবিস্তার বেশী হবে এবং তখন এই সম্পর্কটি হবে একটি ঘাত-শ্রেণী—

$$v_m = Y_1 f + Y_2 f^2 + Y_3 f^3 + \cdots \qquad (১১\text{-}৭.১)$$

যদি স্পন্দকের সরল দোলন হয়, অর্থাৎ $f = F \sin \omega t$ ধরা হয়, তবে $v_m = Y_1 F \sin \omega t + Y_2 F^2 \sin^2 \omega t + Y_3 F^3 \sin^3 \omega t + \cdots$ হবে।

এই সমীকরণে Y_2, Y_3 প্রভৃতি দ্রুতক্ষয়ী সহগ। মাত্র প্রথম দুটি রাশি, বিবেচনা করলে, পাব

$$\begin{aligned} v_m &\doteq Y_1 F \sin \omega t + Y_2 F^2 \sin^2 \omega t \\ &= Y_1 F \sin \omega t + \tfrac{1}{2} Y_2 F^2 (1 - \cos 2\omega t) \\ &= Y_1 F \sin \omega t + \tfrac{1}{2} Y_2 F^2 - \tfrac{1}{2} Y_2 F^2 \cos 2\omega t \end{aligned} \qquad (১১\text{-}৭.২)$$

অর্থাৎ f^2 রাশিটি অঙ্গীভূত করলেই ব্যঞ্জকে একটি ধ্রুবক আর মূল কম্পাংকের দ্বিতীয় সমমেলটি এসে যাচ্ছে, অর্থাৎ স্পন্দনে অপ্রতিসাম্য (asymmetry) এবং নতুন একটি সুর আসছে। f^3 রাশিটি ধরলে, আর একটি ধ্রুবক এবং 3ω কম্পাংকের আরও একটি সমমেল, যুক্ত হ'ত। এইরকম অ-রৈখিক বেগ বা সরণের বেলায় কিন্তু, উপরিপাতন নীতি অচল। সাধারণত কান বা অন্যান্য শব্দ-সন্ধানী যন্ত্রের স্পন্দনে Y_2, Y_3 সহগগুলি খুব ছোট ব'লে উদ্দীপক শব্দ জোরালো না হলে, ১১-৭.১ রাশিমালার দ্বিতীয়, তৃতীয় রাশিগুলির প্রভাব নগণ্যই হয়। কানে শ্রবণদেহলীর 40 থেকে 60 ডেসিবেল

বেশী তীব্রতার এবং 1200 হার্ৎজের বেশী কম্পাংকের শব্দ পড়লে, তবেই আমরা এদের শুনতে পেতে পারি।

তা ছাড়া কানের পর্দা নিজেই অপ্রতিসম স্পন্দক। তার ভেতরের দিকে তিনটি ক্ষুদ্র তরুণাস্থি, পর্দাটিকে একদিকে ভারাক্রান্ত ক'রে রাখে। সুতরাং আপতিত শব্দ বেশী জোরালো না হলেও, পর্দার স্পন্দন অপ্রতিসম হবে—সে যতখানি ভেতরে যাবে ততখানি বাইরে আসবে না (§১৭-৪খ দেখ)।

১৭-৮. যুক্তস্বন:

স্পন্দকের স্পন্দনপ্রকৃতি অরৈখিক হলে, কিম্বা দুই প্রবল শব্দ একযোগে একই সংস্থার ওপর গিয়ে পড়লে, নতুন এক শ্রেণীর শব্দের উৎপত্তি হতে পারে। যদি সেই দুই জোরালো এবং বিশুদ্ধ সুরের কম্পাংক n_1 এবং n_2 হয় এবং তারা একযোগে একই স্পন্দকে আপতিত হয়, তাহলে সামগ্রিকভাবে $an_1 \pm bn_2$ (a ও b ক্ষুদ্রসাংখ্যমান) কম্পাংকের সুরশ্রেণীর উদ্ভব সম্ভব। হেল্ম্হোল্ৎজ এদের যুক্তস্বন বলেছেন।

প্রাথমিক ক্রমের যুক্তস্বনের সংখ্যা দুই—তাদের কম্পাংক $(n_1 + n_2)$ এবং $(n_1 - n_2)$, যথাক্রমে যোগস্বন এবং অন্তরস্বন। এদের প্রথমটি দুর্বল, শোনা কষ্টসাধ্য; দ্বিতীয়টি অনেক বেশী জোরালো, সহজেই শোনা যায়। এদের তীব্রতা মৌল তীব্রতার ওপর নির্ভর করলেও অন্তরস্বনের তীব্রতাও মৌল সুরের তুলনায় দুর্বল। এরা ছাড়াও, $n_1 - 2n_2$, $2n_1 - n_2$, $n_1 + 2n_2$ প্রভৃতি কম্পাংকের দুর্বলতর, উচ্চ ক্রমের যুক্তস্বনও মাঝে মাঝে শোনা যায়।

ক. **উৎপত্তি ও ব্যাখ্যা:** প্রথমে বেহালা ও অর্গানযন্ত্রে এবং পরে বাঁশি, পিয়ানো, হার্মোনিয়ম প্রভৃতি বাদ্যযন্ত্রে অন্তরস্বনের উৎপত্তি লক্ষিত হয়। পুলিস বা রেফারির হুইশ্‌ল সামান্য ছোট-বড় নলযুক্ত দোনলা বাঁশি; বাজালে যে শব্দ শুনি তাও এক অন্তরস্বন। হেল্ম্হোল্ৎজের আবিষ্কৃত দ্বি-সাইরেন যন্ত্র, যুক্তস্বনের বহুল ব্যবহৃত উৎস। ইস্পাতের দুই ছোট্ট পত্রীতে বিদ্যুচ্চুম্বকীয় পদ্ধতিতে খুব দ্রুত ও প্রবল কম্পন ঘটিয়ে ভিড্ শ্রবণগ্রাহ্য অন্তরস্বন সৃষ্টি করেছেন। দুটি সমকেন্দ্রিক কিন্তু পরস্পর লম্বভাবে রাখা তারের কুণ্ডলীর মধ্যে স্বনোত্তর কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহ পাঠিয়ে ব্র্যাগ্ অন্তরস্বন পেয়েছেন; আবার স্বনকম্পাংকের বিদ্যুৎপ্রবাহ পাঠিয়ে যোগস্বনও পাওয়া গেছে।

ইয়ং, ক্যোনিগ প্রভৃতি বিজ্ঞানীদের মতে অন্তরস্বন দ্রুতগতি স্বরকম্প মাত্র, কানের বাইরে এদের বাস্তব কোন অস্তিত্ব নেই ; অর্থাৎ অন্তরস্বন ইন্দ্রিয়সাপেক্ষ অনুভূতি মাত্র। চোখ আছে ব'লে যেমন রঙের অস্তিত্ব, তার কোন ভৌত অস্তিত্ব নেই—সেইরকম কান আছে ব'লেই অন্তরস্বন আছে, তার বাইরে নেই। যুক্তস্বনের উৎপত্তির এই স্বরকম্পতত্ত্ব হেলম্‌হোল্‌ৎজ খণ্ডন করেছেন। তিনি (১) যৌগস্বন আবিষ্কার করেন ; (২) বাতাসে অন্তরস্বনের অস্তিত্ব, তাঁর উদ্ভাবিত অনুনাদকের সাহায্যে প্রতিষ্ঠিত ক'রে তাদের ইন্দ্রিয়নিরপেক্ষতা প্রমাণ করেন ; এবং (৩) যুক্তিযোগে দেখান যে, স্বরকম্পকে নতুন সুর বলা যায় না, কিন্তু অন্তরস্বনকে বলা যায়। বর্তমানে যুক্তস্বনের কর্ণসাপেক্ষ ও কর্ণনিরপেক্ষ দু'রকম অস্তিত্বই স্বীকৃত।

যুক্তস্বনের উৎপত্তি হতে হলে, আপতিত দুই সুরের ক্রিয়ায় স্পন্দকের আচরণ অরৈখিক হবে, অর্থাৎ তার স্পন্দনে অপ্রতিসাম্য আসবে। অপ্রতিসম স্পন্দন ঘটতে হলে, হয় (ক) আপতিত তরঙ্গমালার বিস্তার বেশী হবে, আর নয়তো (খ) স্পন্দকের গড়নেই অপ্রতিসাম্য থাকবে।

কানের পর্দার অপ্রতিসম গড়নের কথা শ্রুতি-সমমেলের প্রসঙ্গে বলা হয়েছে। এই প্রতিসাম্যের অভাবেই দুর্বল শব্দতরঙ্গের উপরিপাতনেও কানে যুক্তস্বনের উৎপত্তি হতে পারে। হেলম্‌হোল্‌ৎজের মতে কর্ণপটহের অপ্রতিসাম্যই ইন্দ্রিয়সাপেক্ষ যুক্তস্বনের উৎপত্তি ঘটায়। আবার ইন্দ্রিয়নিরপেক্ষ যুক্তস্বনের উৎপত্তির ব্যাখ্যায় তিনি জোরালো শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় বায়ুমাধ্যমের অপ্রতিসম স্পন্দনের দিকে দৃষ্টি আকর্ষণ করেন। শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় বায়ুর চাপ-আয়তন-পরিবর্তন রুদ্ধতাপ— pv^{γ} = ধ্রুবক ; কাজেই চাপ-আয়তন লেখ-চিত্র সরলরেখা নয়, অরৈখিক। ফলে চাপ বাড়লে আয়তন যতখানি কমবে, চাপ সমপরিমাণ কমলে আয়তন সে-পরিমাণ বাড়বে না—অর্থাৎ চাপের সঙ্গে বায়ুর আয়তন-পরিবর্তন অপ্রতিসম। সুতরাং দুই জোরালো শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় বায়ুমাধ্যমে যুক্তস্বনের উৎপত্তি সম্ভব।

খ. হেলম্‌হোল্‌ৎজের যুক্তস্বন-উৎপত্তির তীব্রতা-তত্ত্ব : গাণিতীয় বিশ্লেষণ : এই বিজ্ঞানীর মতে, জোরালো শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় স্পন্দনসংস্থার অপ্রতিসম স্পন্দন হয়, কেননা তখন বেগ বা সরণের ব্যঞ্জকে একটি ধ্রুবকের আবির্ভাব হয় (§১১-৭.২)। সেটি একদিকেই স্থায়ী সরণ ঘটায়, বিপরীত দিকে নয়। এইরকম দুটি বলের ক্রিয়াতে যুক্তস্বনের উৎপত্তি হয়। প্রযুক্ত বলের

বিস্তার বেশী হলে, প্রত্যানয়ক বল sx আকারের না হয়ে $sx+rx^2$ আকারের হবে। অবদমন না থাকলে দুই প্রত্যাবর্তী বলের ক্রিয়ায় স্পন্দনের সমীকরণ দাঁড়াবে

$$m\ddot{x}+sx+rx^2=F\cos pt+G\cos qt$$

বা $$\ddot{x}+\omega^2x+ax^2=f\cos pt+g\cos qt \qquad (১১\text{-}৮.১)$$

র‍্যালের নির্দেশিত উপায় অনুযায়ী, প্রথমে ax^2 রাশিটি অগ্রাহ্য ক'রে অবকল সমীকরণ সমাধান ক'রবো। তাহলে সমীকরণ সরাসরি পরবশ কম্পনের মতো হচ্ছে, অর্থাৎ সমাধানে পাচ্ছি

$$x=P\cos pt+Q\cos qt$$

$$=\frac{f}{\omega^2-p^2}\cos pt+\frac{g}{\omega^2-q^2}\cos qt \qquad (১১\text{-}৮.২)$$

x-এর এই মান ১১-৮.১-এ বসালে, পাব

$$\ddot{x}+\omega^2x=f\cos pt+g\cos qt-\frac{af^2}{(\omega^2-p^2)^2}\cos^2 pt$$

$$-\frac{ag^2}{(\omega^2-q^2)^2}\cos^2 qt-\frac{2afg}{(\omega^2-p^2)(\omega^2-q^2)}\cos pt\cos qt$$

$$=f\cos pt+g\cos qt-\frac{af^2}{2(\omega^2-p^2)^2}(\cos 2pt+1)$$

$$-\frac{ag^2}{2(\omega^2-q^2)^2}\cos(2qt+1)$$

$$-\frac{afg}{(\omega^2-p^2)(\omega^2-q^2)}[\cos(p+q)t+\cos(p-q)t]$$

$$(১১\text{-}৮.৩)$$

এই অবকল সমীকরণের সমাধান করলে, মিলবে

$$x=-\frac{af^2}{2(\omega^2-p^2)^2}-\frac{ag^2}{2(\omega^2-q^2)^2}+\frac{f\cos pt}{\omega^2-p^2}+\frac{g\cos qt}{(\omega^2-q^2)}$$

$$+\frac{af^2\cos 2pt}{2(\omega^2-p^2)^2(\omega^2-4p^2)}+\frac{ag^2\cos 2qt}{2(\omega^2-q^2)^2(\omega^2-4q^2)}$$

$$-\frac{afg\cos(p+q)t}{(\omega^2-p^2)(\omega^2-q^2)\{\omega^2-(p+q)^2\}}$$

$$-\frac{afg\cos(p-q)t}{(\omega^2-p^2)(\omega^2-q^2)\{\omega^2-(p-q)^2\}} \qquad (১১\text{-}৮.৪)$$

দেখা যাচ্ছে যে, সমবেত ক্রিয়ার উৎপন্ন স্পন্দনে (১) মূল দুই কৌণিক কম্পাংক p, q রয়েছে, আর নতুন যুক্ত হয়েছে (২) দুই সমমেল $2p$ এবং $2q$, (৩) অন্তরস্বন $(p-q)$, (৪) যৌগস্বন $(p+q)$ এবং (৫) প্রতিসাম্যে হানিকর দুটি অচররাশি। সুতরাং মূল স্পন্দনে প্রথম ক্রমের দুই যুক্তস্বন এবং অপ্রতিসম সরণ যুক্ত হবে। ১১-৮.১ সমীকরণে সরণের উচ্চতর ঘাতগুলি (x^3, x^4, ইত্যাদি) অন্তর্ভুক্ত করলে, উচ্চতর ক্রমের যুক্তস্বনগুলি মিলবে।

এইসব সিদ্ধান্ত প্রতিষ্ঠা করতে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ স্বনক ও গ্রাহক হিসাবে নিজেরই উদ্ভাবিত দ্বি-সাইরেন এবং অনুনাদক ব্যবহার করেন। তাঁর সাইরেনে বায়ুগহ্বর একটি ; তার ওপর প্রযুক্ত জোরালো বায়ুস্রোতকে পরিধিতে ছিদ্রবিশিষ্ট দুটি ঘূর্ণমান চক্র দিয়ে খণ্ডিত ক'রে দুটি পরিবর্তী ঘাতবল উৎপন্ন করা হয়। প্রত্যাশিত যৌগ এবং অন্তরস্বনের কম্পাংকে মেলবদ্ধ দুটি অনুনাদকে সাড়া পেয়ে, তিনি যুক্তস্বনের ইন্দ্রিয়নিরপেক্ষ অস্তিত্ব প্রমাণ করেন। অনুনাদক ছাড়াও, সটান ঝিল্লীতে (membrane) এই দুই স্বনের সমবেদী সাড়া পাওয়ায়, তাঁর সিদ্ধান্ত সমর্থিত হয়। তবে যৌগস্বনের তীব্রতা অন্তর-স্বনের তুলনায় অনেক ক্ষীণ।

সমালোচনা : এই বিশ্লেষণ ও সিদ্ধান্ত সম্বন্ধে তিনটি প্রধান আপত্তি তোলা হয়েছে—

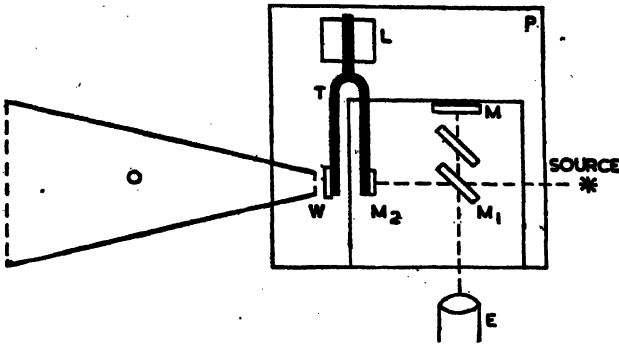
(ক) প্রথম আসত্তিতে (approximation) যাদের নগণ্য ধরা যায়, তাদের প্রভাবের প্রত্যাশিত মাত্রার তুলনায় যুক্তস্বনের তীব্রতা অনেক বেশী ;

(খ) উপযুক্ত পরিবেশে স্বল্পবিস্তার স্পন্দনও ইন্দ্রিয়নিরপেক্ষ যুক্তস্বন সৃষ্টি করে ;

(গ) অন্তরস্বনের তুলনায় যৌগস্বনের তীব্রতা এত ক্ষীণ কেন, তার কোন ব্যাখ্যা নেই।

ভাইজম্যান অবকল সমীকরণে অবদমন অন্তর্ভুক্ত ক'রে প্রথম আপত্তির আংশিক খণ্ডন করেছেন। সাধারণ অপ্রতিসাম্য নীতির অবতারণা ক'রে তিনি দ্বিতীয় আপত্তি নিরসন করতে চেষ্টা করেছেন। তিনি এবং শেফার, বিকল্প সমীকরণও উপস্থাপিত করেছেন কিন্তু সেগুলি সর্বজনগ্রাহ্য হয়নি।

গ. ইন্দ্রিয়নিরপেক্ষ যুক্তস্বনের পরীক্ষাভিত্তিক প্রতিষ্ঠা : রুকার এবং এড্‌সার এই উদ্দেশ্যে স্বনক হিসাবে দ্বি-সাইরেন এবং শব্দসন্ধানী হিসাবে অল্প কম্পাংকের ভারী একটি সুরশলাকা ব্যবহার করেন।

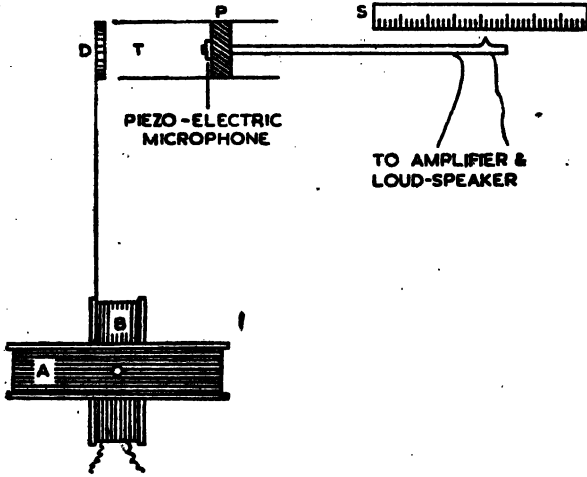
তাঁদের লক্ষ্য ছিল উৎপন্ন যুক্তস্বনের ক্রিয়ায় সুরশলাকার সমবেদী কম্পন সন্ধান করা। সেই উদ্দেশ্যে তাঁরা অতি অল্প সরণমাপক হিসাবে আমেরিকার

চিত্র 11.8—রুকার ও এডসারের পরীক্ষা

বিখ্যাত আলোকবিজ্ঞানী মাইকেলসন উদ্ভাবিত ব্যতিচারমাপক যন্ত্র (interferometer) ব্যবহার করেন।

সন্ধানী সুরশলাকার কম্পাংক 64 এবং সাইরেনে উৎপন্ন যোগ বা অন্তরস্বনের কম্পাংক এই মানেই বিন্যস্ত (adjusted) করা হয়। একটি বড় শংকু O (চিত্র 11.8) উৎপন্ন শব্দতরঙ্গকে সংহত ক'রে সুরশলাকা T-এর ওপর ফেলে। সুরশলাকার অপর বাহুতে মাইকেলসন ব্যতিচারমাপক যন্ত্রের সচল আয়না M_2 লাগানো ; কম্পাংকের ওপর আয়নার ভরের প্রভাব প্রতিমিত করতে সমভরের একটুকরা কাঠ (W) অপর বাহুতে থাকে। সুরশলাকার ডাঁটি একটি ভারী সীসার ব্লকে (L) আটকানো থাকে। স্থির অবস্থায় অভিনেত্র E-তে আলোর ব্যতিচার পটি দেখা যাবে। W-তে আপতিত তরঙ্গের ক্রিয়ায় T-র পরবশ স্পন্দন হয়। তার সরণ মাত্র 1/6500 মিমি হলেও ব্যতিচার-পটির সরণ হবে এবং উজ্জ্বল পটি সরে গিয়ে অনুজ্জ্বল পটির জায়গা নেবে। স্পন্দনের ফলে এরা কেবলই স্থান বিনিময় করতে থাকবে। W-র সরণ, এর চেয়ে অনেক কম হলেও, ব্যতিচার-পটির স্পন্দন পরিষ্কারভাবে বোঝা যাবে। ফরসাইথ এবং সোটার এই স্পন্দনের আলোকচিত্র নিয়ে এঁদের সিদ্ধান্ত দৃঢ়তর ভিত্তিতে রেখেছেন। অতি দুর্বল যোগস্বনেরও বাস্তব অস্তিত্ব এই অতি সুবেদী পরীক্ষায় প্রতিষ্ঠিত হয়েছে।

আর এক ইংরেজ বিজ্ঞানী বয়েজ, সন্ধানী হিসাবে দর্পণযুক্ত সুবেদী অনুনাদক ব্যবহার ক'রে হেল্‌মহোলৎজের তত্ত্ব সমর্থন করেছেন।

রুকার ও এড্‌সারের পরীক্ষায় হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-প্রস্তাবিত বর্গসূত্র (square-law) অপ্রতিসাম্য তত্ত্বের দুর্বলতাও ধরা পড়ল। সুরশলাকার স্পন্দন-

চিত্র 11.9—প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার উপরিপাতনে যুক্তস্বন

বিস্তার অতি সামান্য, অর্থাৎ তার স্পন্দন প্রতিসম; আবার যৌগস্বনও খুবই দুর্বল। তাই ভাইজম্যান এই তত্ত্বের সংশোধন ক'রে সাধারণ অপ্রতিসাম্য তত্ত্ব প্রস্তাব করেন।

(২) ব্র্যাগ এজন্যে A এবং B দুটি প্রত্যাবর্তী তাড়িৎ-বাহী কুণ্ডলী (চিত্র 11.9) ব্যবহার করেন। তাদের মধ্যে প্রবাহমাত্রা $I_1 \cos pt$ এবং $I_2 \cos qt$। দ্বিতীয় কুণ্ডলী কাগজপৃষ্ঠের উল্লম্ব এক অক্ষ সাপেক্ষে ঘুরতে পারে—প্রযুক্ত দ্বন্দ্বের মান $I_1 I_2$-এর সমানুপাতিক। T নলের মধ্যে P একটি স্ফটিক-মাইক্রোফোন-বাহী পিস্টন। কুণ্ডলীতে প্রবাহ চললে নলের মুখে D চাক্‌তির স্পন্দন হয়। P-কে এগিয়ে-পেছিয়ে অনুনাদ সৃষ্টি করা হয়—মাইক্রোফোনের সঙ্গে যুক্ত লাউড-স্পীকারে তা সহজেই ধরা যায়। 50 ও 250 হাৎ'জ কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী প্রবাহ ব্যবহার ক'রে ব্র্যাগ যৌগস্বন (300~) এবং অন্তর-স্বনের (200~) অস্তিত্ব প্রতিষ্ঠা করেছেন।

বেতারসম্প্রচারে ব্যবহৃত side-bands এবং বিচ্ছুরণে রমণ-বর্ণালীর সঙ্গে যুক্তস্বনের ঘনিষ্ঠ সাদৃশ্যের ইঙ্গিতও ব্র্যাগ দিয়েছেন।

ঘ. ভাইজম্যানের সাধারণ প্রতিসাম্য তত্ত্ব : হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজের তীব্রতা- বা বর্গসূত্র-অপ্রতিসাম্য তত্ত্ব দিয়ে স্বল্পবিস্তার শব্দের ক্রিয়ায় উৎপন্ন যুক্তস্বনের ব্যাখ্যা মেলে না। ভাইজম্যানের তত্ত্ব অনুযায়ী স্পন্দকটি যদি একদিকে ভারাক্রান্ত থাকে, তাহলে তার স্পন্দন অপ্রতিসম হবে এবং এই অপ্রতিসাম্য বিস্তার-নিরপেক্ষ—আপতিত শব্দ-বিস্তারের সঙ্গে নিঃসম্পর্ক।

তিনি সটান এক ঝিল্লীর তলায় ঠিক মাঝখানে ছোট এক ভর লাগিয়ে তাতে কেন্দ্রীয় অপ্রতিসাম্য আরোপিত করলেন। তারপর দুটি সুরশলাকার শব্দে একযোগে তাকে আলোড়িত করা হ'ল। স্পষ্টতই এখানে আপতিত তরঙ্গদ্বয় স্বল্পবিস্তার। আলোকরশ্মি ব্যবহার ক'রে আলোড়নের কাল-সরণ রেখা আলোকসচেতন ফিল্‌মে ফেলে ছবি নেওয়া গেল। এই রেখা থেকে দেখা গেল, সাম্য অবস্থানের দু'দিকে সরণ অসমান ; ভারাক্রান্ত দিকে বেশী, অর্থাৎ আলোড়ন অপ্রতিসম। এই সরণ-রেখার ফুরিয়ার বিশ্লেষণ ক'রে দুই মৌল কম্পাংক n_1 এবং n_2, অনেক বেশী বিস্তারের অন্তরস্বন $(n_1 - n_2)$, $(2n_2 - n_1)$ কম্পাংকের দুর্বল শব্দ এবং কখনও কখনও দুর্বল যোগস্বন $(n_1 + n_2)$ পাওয়া যায়। পরে (§১৭-৪খ) দেখব যে, কানের পর্দার গঠন ও আচরণ এইরকমই হয়। এইভাবে যুক্তস্বনের যোগ ও অন্তরস্বন এবং উচ্চতর ক্রমের সুরের উৎপত্তি এবং তাদের কর্ণসাপেক্ষ বা কর্ণনিরপেক্ষ প্রকৃতির মোটামুটি ব্যাখ্যা মেলে। যুক্তস্বনের উৎপত্তির সর্বজনগ্রাহ্য ব্যাখ্যা এখনও পাওয়া যায়নি।

প্রশ্নমালা

১। উপরিপাতন নীতি বলতে কি বোঝ ? উদাহরণযোগে ব্যাখ্যা কর। কোথায় এই নীতি প্রযোজ্য, কোথায় বা ব্যর্থ ? ব্যর্থতার কয়েকটি উদাহরণ দাও।

২। সময়সাপেক্ষে পরিবর্তী লব্ধিসরণবিস্তার শব্দের বেগে চললে স্বরকম্প শোনা যায়—ব্যাখ্যা কর। কি কি সর্তসাপেক্ষে স্বরকম্প শোনা যায়, বুঝিয়ে বল। স্বরকম্পকে কি সুর বলা চলে ? না, কেন ?

৩। স্বরকম্পের উৎপত্তি ব্যাখ্যা কর এবং ব্যবহারিক প্রয়োগ আলোচনা কর। সমবিস্তারের তিনটি দোলজাতীয় তরঙ্গের কম্পাংক 400, 401, 402 হলে, কয়টি স্বরকম্প হবে ? [একটি]

1000 চক্র/সে কম্পাংকের দুই সংসক্ত স্বনকের সংযোগকারী সরলরেখা

কত বেগে এগোলে সেকেণ্ডে দশবার স্বরকম্প ঘটবে ? (শব্দের বেগ 1120 ফিট/সে) [5.6 ফি/সে]

৪। সমবিস্তার কিন্তু $(n+m)$ এবং $(n-m)$ কম্পাংকের দুই সরল দোলজাতীয় তরঙ্গ c বেগে মাধ্যমের মধ্যে দিয়ে এগোলে মাধ্যমের আলোড়ন কিরকম হবে ? ($n > m$)। 100 ও 101 সেমি দৈর্ঘ্যের দুই তরঙ্গ 6 সেকেণ্ডে 20টি স্বরকম্প ঘটালে, শব্দবেগ কত ? [336 মি/সে]

৫। শব্দের ব্যতিচার কাকে বলে ? কি কি সর্তাধীনে তা ঘটে ? স্বরকম্পের সঙ্গে তার তফাৎ কোথায় ? কয়েকটি উদাহরণ দাও।

দুই সংসক্ত বিন্দু উৎস (S_1 এবং S_2) থেকে সমদশায় দোলজাতীয় তরঙ্গ উৎপন্ন হচ্ছে। তাদের থেকে কোন এক বিন্দু P-র দূরত্ব যথাক্রমে r_1 এবং r_2 হলে, দেখাও যে, তাদের উপরিপাতনে উৎপন্ন তরঙ্গের সরণবিস্তার P-র অবস্থান-ভেদে মোটামুটি $[4a/(r_1+r_2)] \cos (\pi/\lambda)(r_1+r_2)$ সমীকরণটি মেনে চলে। (11.4 চিত্র দেখ)

৬। ব্যতিচারে শক্তির যে নববিন্যাস ঘটে, তা দেখাও। একই কম্পাংকের কোন সুর l_1 এবং l_2 দৈর্ঘ্যের দুটি নলের মধ্যে দিয়ে নিয়ে গিয়ে তাদের পুনর্মিলন ঘটানো হ'ল। কম্পাংক বদলালে লব্ধি-শব্দের প্রকৃতি কিরকম হবে ?

৭। যুক্তস্বন কি ? তাদের উৎপত্তি ব্যাখ্যা কর। তারা কি কর্ণসাপেক্ষ না কর্ণনিরপেক্ষ ? শাব্দচাপে কানের সাড়া অরৈখিক হওয়াতেই শ্রুতিসমমেল এবং যুক্তস্বনের উৎপত্তি হয়—আলোচনা কর। শাব্দচাপ $p=P \cos \omega t$ এবং কানের সাড়া $r=a_1 p+a_2 p^2+a_3 p^3$ হলে, ω, 2ω এবং 3ω কম্পাংকের তিনটি সুর শোনা যাবে এবং তাদের সরণবিস্তার যথাক্রমে $(a_1 P+\frac{3}{4} a_1 P)$, $\frac{1}{2} a_2 P^2$ এবং $\frac{1}{4} a_3 P^3$ হবে—প্রমাণ কর।

স্বরকম্প ও অন্তরস্বনের প্রভেদ নির্দেশ কর।

৮। যুক্তস্বনের কর্ণ-নিরপেক্ষ অস্তিত্ব কি-ভাবে প্রতিষ্ঠিত হয় ?

১২

তার ও ঝিল্লীর স্পন্দন

(Vibration of Strings and Membranes)

১২-১. সূচনা :

৫-১ অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে, স্পন্দন ও তরঙ্গগতির জন্যে স্পন্দক ও মাধ্যম দুয়েরই জড়তা এবং স্থিতিস্থাপকতাধর্ম থাকা চাই—তবে স্পন্দকে তারা পুঞ্জীভূত আর মাধ্যমে তারা সুষমভাবে বণ্টিত। সুরের জগতে তারের উল্লেখ্য বৈশিষ্ট্য এই যে, সে একাধারে স্পন্দক এবং তরঙ্গবাহী মাধ্যম। তাই তারের স্পন্দনের তাত্ত্বিক আলোচনার গুরুত্ব অনেক।

তারের স্পন্দনের ব্যবহারিক গুরুত্বও কিছু কম নয়—কারণ সে একমাত্রিক (one-dimensional) স্পন্দক, তাই সরলতম, এবং বোধ হয় আদিমতম বাজনা। অতীতে শিকারীর কানে তার ধনুষ্টংকারই প্রথম সুরের অনুভূতি জাগিয়েছিল ; অনেকের মতে ততযন্ত্র তথা তারের বাদ্যযন্ত্রের সুরু সেখান থেকেই। প্রাচীন গ্রীসের আদি বাদ্যযন্ত্র, বায়ব-বীণা (Aeolian harp), মনে হয়, আধুনিক তারের বাজনার প্রথম সূরী। স্পন্দক হিসাবে তারের গাণিতীয় বিশ্লেষণ সরলতম।

স-টান (stretched) তারের অনুপ্রস্থ কম্পনে সুরেলা শব্দ হয়। এইরকম তারের কোন এক বিন্দুকে স্থানচ্যুত ক'রে ছেড়ে দিলে, সে স্পন্দিত হতে থাকে ; তখন সেই বিন্দু থেকে বিপরীতমুখে সমদশা তরঙ্গ তার বরাবর এগোতে (চিত্র 9.4a) থাকে। তারা দৃঢ় তারপ্রান্ত থেকে প্রতিফলিত হয়ে ফেরে এবং যথাযোগ্য সর্তাধীনে উপরিপাতন ঘটলে, তারটি এক বা ততোধিক স্থাণু লুপে ভাগ হয়ে (চিত্র 5.13) স্পন্দিত হতে থাকে। প্রতিটি স্পন্দনরীতিতেই উৎসারিত সুরের তীক্ষ্ণতা এবং জাতি সুনির্দিষ্ট। তারের কোন বিন্দুকে স্থানচ্যুত করার তিনটি পন্থা প্রচলিত—(১) টংকার (plucking) দেওয়া, (২) আঘাত (striking) করা, এবং (৩) ছড় টানা (bowing)।

র‍্যালের সংজ্ঞানুযায়ী, স্পন্দনশীল তার, দুই বিন্দুতে স-টানভাবে বাঁধা, সম্পূর্ণ সুষম, নমনীয় অথচ কঠিন পদার্থনির্মিত তন্তুবিশেষ। এই সংজ্ঞামতে তারের কোন কাঠিন্য বা দার্ঢ্য নেই—আদর্শ তারের অসীম

কেবলমাত্র টান-সাপেক্ষ এবং কাঠিন্য-নিরপেক্ষ। কাজেই বাহ্য টান প্রয়োগ ক'রে তারের স্পন্দনাংক ইচ্ছামতো পাল্টানো সম্ভব। বাস্তবে এইরকম তার অনায়ত্ত, কেননা কঠিন পদার্থে তৈরী ব'লেই তারমাত্রেরই অল্পবিস্তর কাঠিন্য থাকার কথা; সে যত সরু হবে, অর্থাৎ দৈর্ঘ্য-ব্যাস অনুপাত যতই বাড়বে, কাঠিন্যের প্রভাব ততই কমবে; সরু তারের একটা ছোট টুকরোকে তাই আদর্শ তার বলা যায় না।

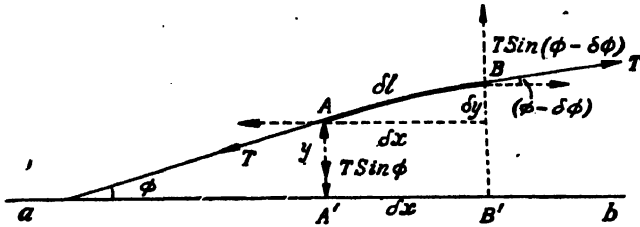
তার যেমন একমাত্রিক স-টান স্পন্দক, ঝিল্লীকে তেমনই দ্বিমাত্রিক (two-dimensional) স-টান স্পন্দক বলা চলে; এর দৈর্ঘ্য আছে, প্রস্থ আছে, কিন্তু বেধ নেই। তাত্ত্বিক সংজ্ঞানুসারে **ঝিল্লী—সর্বদিকে সমটানে বিতত্তিত (stretched) সম্পূর্ণ নমনীয়, নগণ্যবেধ, কঠিন ফলক (lamina)-বিশেষ**। তারের মতো আদর্শ ঝিল্লীরও কাঠিন্য নেই, তার স্পন্দন সম্পর্ণভাবে টান- বা তাতি-শাসিত। এখন, আদর্শ তারের মতো আদর্শ ঝিল্লীও অবাস্তব কল্পনা, কেননা সামান্য হলেও তার বেধ তো থাকবেই, ফলে কাঠিন্যও কিছুটা থাকবে। **সামান্য বেধযুক্ত ঝিল্লীকে ছদ (diaphragm)** বলে। ছদের স্পন্দন তাতি এবং কাঠিন্য দুয়ের দ্বারাই নিয়ন্ত্রিত হয়।

বাদ্যযন্ত্রের উদাহরণ হিসাবে, তারের ক্ষেত্রে তিনরকম উদ্দীপন (excitation) প্রথার প্রতিভূ হিসেবে যথাক্রমে—সেতার (টংকারিত), পিয়ানো (আহত) এবং বেহালাকে (ছড়-টানা) ধরতে পারি। প্রতি শ্রেণীতেই এরা ছাড়াও—গীটার, হার্মোনিয়ম, বীণা, সরোদ, এস্রাজ প্রভৃতি আরও বহু যন্ত্র আছে। বাঁয়া-তবলা, ঢাক-ঢোল প্রভৃতি ঘাতযন্ত্রে (percussion) স্পন্দনশীল ছদ স্বনকের ভূমিকায় থাকে। ১৭-১৪ এবং ১৭-১৫ অনুচ্ছেদে এদের সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হবে।

স-টান তারের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনও সম্ভব। সে স্পন্দন সম্ভব হয় কাঠিন্যের কারণে। সেক্ষেত্রে তারটি আদর্শচ্যুত এবং স্বনক হিসেবে অচল। তাই সেই স্পন্দন আমরা আলোচনা ক'রবো না।

১২-২. তারে অনুপ্রস্থ তরঙ্গের বেগ:

12.1 চিত্রে x-অক্ষ বরাবর অসীম দৈর্ঘ্যের তারকে T ডাইন টান দিয়ে রাখা হয়েছে। তারের ছোট এক অংশ δl-কে স্থানান্তরিত ক'রে $A'B'(=\delta x)$ অবস্থান থেকে AB অবস্থানে আনা হয়েছে; এই অংশের দুই প্রান্তের সরণ যথাক্রমে y এবং $y+\delta y$ এতই সামান্য যে, দুই প্রান্তে টান T অপরিবর্তিত

ধ'রে নেওয়া চলে। ছবিতে দেখা যাচ্ছে যে, দুই প্রান্তে T বিপরীতমুখী হলেও আর একই রেখা বরাবর নেই, সুতরাং AB-র ওপরে এক লব্ধি-প্রত্যানয়ক-বল $A'B'$ অবস্থানমুখে ক্রিয়া করবে।

চিত্র 12.1—স-টান তারে সক্রিয় বলশ্রেণী

প্রত্যানয়ক এই বলের মান পেতে হলে A এবং B দুই বিন্দুতেই টান T-র খাড়া উপাংশ বিবেচনা করতে হবে; তারা সমান্তরাল, বিষমমুখী এবং অসমান। A বিন্দুতে খাড়া উপাংশ নিম্নগামী, তার মান $T \sin \phi$; B-তে ী, মান $T \sin (\phi - \delta\phi)$। তাই লব্ধিমান নিম্নমুখী, তার মান

$$T \sin \phi - T \sin (\phi - \delta\phi) = T \cos \phi . \delta\phi \quad [\because \quad \delta\phi \to 0]$$
$$= T\, \delta(\sin \phi)$$

এখন $\delta l = \delta x$, কারণ পার্শ্বসরণের ফলে আদর্শ তার লম্বায় বাড়ে না। তারের একক দৈর্ঘ্যের ভর μ এবং লব্ধি-বলের ক্রিয়ায় AB-র ত্বরণ $\partial^2 y/\partial t^2$ ধরলে জাড্য-বলের মোট মান $\mu \delta x . \partial^2 y/\partial t^2$ হবে। জাড্য-বল এবং লব্ধি-বল সমীকৃত করলে, পাব

$$\mu\, \delta x .\, \partial^2 y/\partial t^2 = T\, \delta(\sin \phi) . \delta x \simeq T\, \delta(\tan \phi)^* \delta x$$

$$= T \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\delta y}{\delta x}\right) \delta x \qquad (১২\text{-}২.১)$$

* ক্রম অনুসারে বিস্তৃত করলে, মেলে

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{\underline{|3}} + \frac{\theta^5}{\underline{|5}} + \cdots \qquad \tan \theta = \theta + \frac{\theta^3}{\underline{|3}} + \frac{2}{15}\theta^5 + \cdot$$

সুতরাং θ-র মান ছোট হলে, $\sin \theta = \theta = \tan \theta$ হয়।

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu}\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$\therefore \quad c = \sqrt{T/\mu} \qquad (১২-২.২)$$

অর্থাৎ স-টান তারের ছোট্ট একটা অংশকে সামান্য সরিয়ে ছেড়ে দিলে সেই বিন্দুতে অনুপ্রস্থ তরঙ্গের উৎপত্তি হয় এবং সে অপরিবর্তিত আকারে $\sqrt{T/\mu}$ বেগে তার বরাবর এগোয়। এই তরঙ্গবেগ, দেখাই যাচ্ছে যে, তারের উপাদানের স্থিতিস্থাপকতা-নিরপেক্ষ, কিন্তু ঘনত্ব-সাপেক্ষ ($\mu = 1.\pi r^2.\rho$) —এই বৈশিষ্ট্যের জন্যই বাদ্যজগতে তারের এতখানি গুরুত্ব।

উদাহরণ ঃ দেখাও যে, তারে অনুদৈর্ঘ্য ও অনুপ্রস্থ তরঙ্গের বেগ কখনই সমান হতে পারে না।

সমাধান ঃ তারের প্রস্থচ্ছেদ s, এবং তার উপাদানের ইয়ং গুণাংক q ও ঘনত্ব ρ ধরলে,

$$c_l = \sqrt{q/\rho} = \sqrt{qs/s\rho} \; ; \; c_t = \sqrt{T/\mu} = \sqrt{T/s\rho}$$

তাহলে $qs = T$ হলে, $c_l = c_t$ হবে ; অর্থাৎ $q = T/s =$ অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন ; কিন্তু সংজ্ঞানুসারে $q =$ অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন/অনুদৈর্ঘ্য বিকৃতি ; সুতরাং $T = qs$ হলে, বিকৃতি $l/L = 1$ হবে। সেক্ষেত্রে $l = L$ অর্থাৎ টানের চোটে, তারকে বেড়ে লম্বায় দ্বিগুণ হতে হবে। সে অবস্থায় পৌঁছানোর অনেক আগেই তার ছিঁড়ে যাবে। কাজেই তারে দুই শ্রেণীর তরঙ্গ সমবেগে চলতে পারে না।

১২-৩. তারে তরঙ্গ-সমীকরণের সমাধান ঃ

৫-৯ অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে, $(ct \pm x)$ রাশির যেকোন অপেক্ষক $f_1(ct - x)$ বা $f_2(ct + x)$ হচ্ছে $(\partial^2 y/\partial^2 t) = c^2(\partial^2 y/\partial x^2)$ অবকল সমীকরণের সমাধান। এই ফলন বা অপেক্ষকের প্রকৃতি স্বেচ্ছিক এবং উদ্দীপন-রীতি-নির্ভর। গাণিতীয় বিচারে ফলনের সাইন-প্রতিরূপ অর্থাৎ

$y = y_m \begin{matrix}\cos \\ \sin\end{matrix} \beta(ct \pm x)$ রূপটিই সরলতম। তারা আসলে

$$y = y_m e^{j\beta(ct \pm x)} = y_m e^{j(\omega t \pm \beta x)} = y_m e^{j\omega t} . e^{\pm j\beta x} \qquad (১২-৩.১)$$

ব্যঞ্জকের যথাক্রমে বাস্তব এবং অলীক অংশ। ১২-৩.১ সমাধানটি দুটি

কলনের গুণফল, তাদের একটি কেবলমাত্র কাল (t)-নির্ভর, অপরটি কেবলমাত্র দেশ (x)-সাপেক্ষ। সার্বিক সমাধান পেতে গেলে ৫-১০ অনুচ্ছেদে আলোচিত চলক-বিশ্লেষণ পদ্ধতি এখানেও বিশেষ উপযোগী। এক্ষেত্রে লেখা চলে

$$y=f(x,\,t)=X(x).T(t)=XT \text{ (ধরা যাক)} \qquad (\text{১২-৩.২})$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}=T\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \text{ এবং } X\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\therefore \quad X\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}=c^2.T\frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \text{ বা } \frac{1}{T}.\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}=c^2.\frac{1}{X}\frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

$$(\text{১২-৩.৩})$$

এই সমীকরণের বাঁ ও ডান পাশ যথাক্রমে T- এবং X-নির্ভর রাশি; তারা আবার পরস্পর নিরপেক্ষ ব'লে সমীকরণের দুই পাশই অচররাশি; তাদের প্রত্যেককেই $-\omega^2$ রাশির সমান ধরা হোক। ω^2 রাশিটি ঋণাত্মক না হলে, y কেবলই বেড়ে চলবে, না হয় কমে চলবে, অর্থাৎ অপর্যাবৃত্ত হবে; এক্ষেত্রে তা ঘটনাবিরুদ্ধ, কেননা এটা তরঙ্গগতি। কাজেই

$$\frac{c^2}{X}.\frac{\partial^2 X}{\partial x^2}=-\omega^2 \text{ বা } \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}+\frac{\omega^2}{c^2}X=0$$

$$\therefore \quad X(x)=A\cos\omega x/c+B\sin\omega x/c$$

$$\text{অনুরূপে } \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}.\frac{1}{T}=-\omega^2$$

$$\text{অর্থাৎ } T(t)=C\cos\omega t+D\sin\omega t$$

কাজেই তারের ক্ষেত্রে তরঙ্গ-সমীকরণের সমাধান হবে

$$y=X(x).T(t)=(A\cos\omega x/c+B\sin\omega x/c).$$
$$(C\cos\omega t+D\sin\omega t) \qquad (\text{১২-৩.৪})$$

এখানে A, B, C, D স্বেচ্ছিক ধ্রুবক; আদ্য সর্ত থেকে তাদের মান নির্ণয় করা সম্ভব। লক্ষণীয় যে, সমাধানে ω-র মানের ওপর কোনরকম বাধানিষেধ নেই, অর্থাৎ সমাধানের অসংখ্যরকম আকার হতে পারে। সচল তরঙ্গ এই সমাধানের একটি বিশেষ রূপ মাত্র।

প্রান্তিক সর্ত পূরণের কাজে, চলক-বিশ্লেষণ প্রণালীতে সমতলীয় চল-তরঙ্গের সমীকরণ সমাধান করায় বিশেষ সুবিধা। তাতে কেবলমাত্র সম্ভবপর

ω-মানগুলিই বেরিয়ে আসে। পরের আলোচনা থেকে এই উক্তির অর্থ পরিষ্কার হবে।

১২-৪. দুই প্রান্তে দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ তারের স্পন্দন (বার্নুলি-র সূত্র):

আমাদের এপর্যন্ত আলোচনায় স-টান তারের দৈর্ঘ্য অসীম ধরা হয়েছে। একসঙ্গে দুটো সর্ত (স-টান অথচ অসীম দৈর্ঘ্য) বাস্তবে অপূরণীয়—তারের দৈর্ঘ্য (l) সসীমই হয় এবং গণিতীয় সরলতার খাতিরে দুই প্রান্ত অনড়ভাবে আবদ্ধ ধরা হয়। কাজেই প্রান্তিক সর্ত হবে যে, তারের দুই সীমায় কোন সরণ সম্ভব নয়। প্রান্তিক সর্ত আরোপ করলেই তারের স্পন্দনের গতিরীতি সীমিত-সংখ্যক হয়ে যায় এবং প্রতিটি স্পন্দনই পর্যাবৃত্ত হয়। ব্যাপারটা কিছুটা অস্বাভাবিক, কেননা বিশেষ রীতিতে স্পন্দন সুরু না করলে যে স্পন্দন পর্যাবৃত্ত-দোলন হয় না, সে-কথা আমরা যুগ্ম স্পন্দনের আলোচনায় দেখেছি। অথচ, যেকোন তারের দুই প্রান্ত শক্ত ক'রে আটকে রেখে কাঁপালেই পর্যাবৃত্ত স্পন্দন হবে! ১২-৩.৪-এ যথাযথ প্রান্তিক সর্ত আরোপ করলেই x এবং t-র ফলনের আকারে তারের কোন বিন্দুর সরণের প্রতিরূপ পাওয়া যাবে।

আরোপিত প্রান্তিক সর্ত-দুটি হচ্ছে—সব সময়েই $x=0$ এবং $x=l$ বিন্দু-দুটিতে সরণ $y=0$ হবে। সুতরাং ১২-৩.৪ থেকে

$$0=(A+B.0)(C\cos\omega t+D\sin\omega t) \qquad (১)$$

এবং
$$0=(A\cos\omega l/c+B\sin\omega l/c).(C\cos\omega t+D\sin\omega t) \qquad (২)$$

এখন প্রথম সম্পর্ক থেকে পাচ্ছি, সব সময়েই $A=0$, কেননা ব্যঞ্জকের দ্বিতীয় রাশিটি t-র সকল মানে শূন্য হতে পারে না। তা ছাড়া, দ্বিতীয় সম্পর্ক থেকে একই বিচারে পাচ্ছি $\sin\omega l/c=0$ (কেননা সব ক্ষেত্রেই $B\neq 0$ এবং $t\neq 0$)। তাহলে

$$\omega l/c=m\pi \qquad (১২\text{-}৪.১)$$

$$(m=\text{অখণ্ড সাংখ্যমান}=1, 2, 3,\cdots \text{ইত্যাদি})$$

তখন $\omega_1=\pi c/l$, $\omega_2=2\pi c/l$, $\omega_3=3\pi c/l\cdots$, $\omega_m=m\pi c/l$ হবে। এগুলি ছাড়া ω-র অন্য মান থাকা সম্ভব নয়; আর $m=0$ বা $B=0$ সর্তগুলিও অগ্রাহ্য, কারণ তাহলে t-র সকল মানেই $y=0$ হবে, অর্থাৎ তারের কোন সরণ তথা স্পন্দন হবে না।

অতএব দুই প্রান্ত অনড়ভাবে আঁটা থাকলে, তারের স্পন্দনের গাণিতীয় প্রতিরূপ দাঁড়াবে

$$y_m = B_m \sin(\omega_m x/c).(C_m \cos \omega_m t + D_m \sin \omega_m t) \quad (১২\text{-}৪.২)$$

(m-এর ভিন্ন ভিন্ন অখণ্ড মানের ভিত্তিতে ω-র অসংখ্য মান হতে পারে)

$$= \sin(\omega_m x/c).(a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t)$$

$$= (a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t) \sin m\pi x/l \quad (১২\text{-}৪.৩ক)$$

$$= R_m \cos(\omega_m t - \phi_m) \sin m\pi x/l \quad (১২\text{-}৪.৩খ)$$

$$[\, a_m = B_m C_m,\ b_m = B_m D_m,\ a_m^2 + b_m^2 = R_m^2,\ \tan\phi_m = b_m/a_m \,]$$

আমাদের সুরুর অবকল সমীকরণ রৈখিক এবং সমসত্ত্ব, আর m-এর প্রতিটি মানের জন্যে আলাদা আলাদা সমাধান আসবে ; তাই সার্বিক সমাধান হবে, সব স্বতন্ত্র সমাধানগুলির সমষ্টি (স্পন্দনগুলির ভৌত নিরপেক্ষতার অন্যতম নিদর্শন) ; অর্থাৎ

$$y = \sum_{m=1}^{m=\infty} (a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t) \sin m\pi x/l \quad (১২\text{-}৪.৪ক)$$

$$= \sum_{m=1}^{m=\infty} R_m \cos(\omega_m t - \phi_m) \sin m\pi x/l \quad (১২\text{-}৪.৪খ)$$

তারের δx দৈর্ঘ্যের যেকোন অংশের m-তম কম্পনভঙ্গী সরল দোলন—ω_m তার স্পন্দনাংক আর $R_m \sin m\pi x/l$ দোলন-বিস্তার। এই সূত্রটি প্রখ্যাত সুইডিস্ গণিতজ্ঞ বার্নুলীর উদ্ভাবিত। সুতরাং ওপরে যে বলা হয়েছিল—প্রান্তিক সর্ত আরোপ করলেই তারের গতি সরল-দোলন হবে, তা ১২-৪.২ সমীকরণে প্রতিষ্ঠিত হ'ল।

বিধিবদ্ধ (eigen) মান, ফলন এবং কম্পাংক : ১২-৩.৩ সমীকরণে ($A \cos \omega x/c + B \sin \omega x/c$) রাশিটি তরঙ্গের দেশাংশ নির্দেশ করে—সেখানে ω-র মানে কোন বাধানিষেধ নেই। কিন্তু যেই তারের দুই প্রান্ত আটকে দেওয়া হয়, তখনই ω-র মানে বাধানিষেধ এসে যায়—π-এর অখণ্ড গুণিতক ছাড়া ω-র সমাধান হয় না।

এইরকম যে-সমস্ত বিধিবদ্ধ মানের ক্ষেত্রেই কেবল সমাধান থাকে তাদের *eigen values* বলে। স্পন্দনশীল তারের স্পন্দনাংক এইরকম **বিধিবদ্ধ বা আইগেন-মান**; কেননা ১২-৪.১ সমীকরণ থেকে পাওয়া যাচ্ছে $\omega/c = m\pi/l$, যেখানে m-এর মান 1, 2, 3, ⋯ প্রভৃতি অখণ্ড সংখ্যা। এদের সংশ্লিষ্ট সমাধানগুলি বিধিবদ্ধ বা আইগেন-ফলন। ১২-৪.৩ সমীকরণ অনুসারে বিধিবদ্ধ ফলনগুলির মান

$$S_m(x) = \sin m\pi x/l$$

হবে। সহগ R_m-এর সাপেক্ষে এই বিধিবদ্ধ ফলনগুলির মান অনির্দিষ্ট; m-এর মানের সাথে সাথে R_m-এর মান বদলাতে থাকবে এবং সংশ্লিষ্ট শ্রেণীগুলি ফুরিয়ার-প্রসারণের সাইন-রাশিমালা হবে। তারা যে কম্পাংকগুলি নির্দেশ করবে সেগুলিও বিধিবদ্ধ কম্পাংকশ্রেণীভুক্ত। §১২-৯-তে তারের জটিল স্পন্দন-বিশ্লেষণে বিধিবদ্ধ ফলনের প্রয়োগ দেখা যাবে।

১২-৫. প্রান্তবদ্ধ তারের স্পন্দনের সম্ভবপর বা বিশিষ্ট বা বিধিবদ্ধ কম্পাংক :

তারের দুই সীমা অনড়ভাবে আটকানো থাকলে যেসব পর্যাবৃত্ত স্পন্দন হয় তাদের কম্পাংক ১২-৪.১ থেকে মেলে। তাদের মান

$$n_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = \frac{m\pi c}{2\pi l} = \frac{mc}{2l} = \frac{m}{2l}\sqrt{T/\mu} \qquad (১২\text{-}৫.১)$$

এখানে n_m, m-তম ভঙ্গীতে স্পন্দনের কম্পাংক এবং m অখণ্ড সংখ্যা। স্বভাবতই $m=1$ হলে, সম্ভবপর নিম্নতম কম্পাংক পাওয়া যাবে এবং সেই স্পন্দনের সুরকে **মূল স্বর** বলে। তার মান

$$n_1 = \frac{c}{2l} = \frac{1}{2l}\sqrt{T/\mu} \qquad (১২\text{-}৫.২)$$

উচ্চতর কম্পাংকগুলি, এর অখণ্ড গুণিতক অর্থাৎ উপসুরগুলি (overtones) মূল সুরের সমমেল (harmonics)। তারের স্পন্দনের এই কম্পনবৈশিষ্ট্য বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ, কেননা উপসুরগুলি সমমেল হলে শব্দ বিশেষ শ্রুতিমধুর হয়। খুব অল্পসংখ্যক স্পন্দকেরই উপসুরগুলি সমমেল।

বাস্তবে স্পন্দনশীল তারের কম্পাংক : আদর্শ তারের স্পন্দন, দুটি সর্তাধীন—(১) উপাদানে কাঠিন্য বা দৃঢ়তা মোটেই নেই; (২) প্রান্তদ্বয় অনড়ভাবে আটকানো। বাস্তবে দুই সর্ত থেকেই অল্পাধিকতর বিচ্যুতি থেকে

যায়ই, সুতরাং তারের কম্পনের বাস্তব কম্পাংক আদর্শ কম্পাংক থেকে আলাদা হয়ে থাকে।

(১) তারে **সীমিত কাঠিন্য** থাকলে, স্থির অবস্থান থেকে বিচ্যুত অংশের ওপর টানের উপাংশের ($T \sin \phi$) সঙ্গে বংকন-জনিত স্থিতিস্থাপক বল যুক্ত হয়ে প্রত্যানয়ক বল বাড়ায়। বংকনের জন্য যে স্পন্দন হয় সেই কম্পাংককে (n_0) ক্যান্টিলেভার-কম্পাংক (১-১১.৭) বলে। শুধু টানের জন্য সেই তারের কম্পাংক n হলে, তারের বাস্তব কম্পাংক $n' = \sqrt{n^2 + n_0^2}$ হয়। ক্যান্টিলেভার কম্পাংক তারের উপাদানের এবং প্রস্থচ্ছেদের আকারের ওপর নির্ভর করে। উপাদানের ইয়ং-গুণাংক q এবং প্রস্থচ্ছেদ r ব্যাসার্ধের বৃত্ত হলে, তারের m-তম স্পন্দনভঙ্গীতে কম্পাংক হবে

$$n = \frac{m}{2l}\left(\frac{T}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}}\left(1 + \frac{m^2\pi^3 r^4 q}{8Tl^2}\right)$$

বন্ধনীর ভেতরে দ্বিতীয় রাশিটি তারের কাঠিন্যজনিত শুদ্ধি। মূল সুরে এই শুদ্ধির মোট পরিমাণ কম, কিন্তু উচ্চতর সমমেলগুলিতে কাঠিন্যজনিত অশুদ্ধি ক্রমেই প্রকট হয়ে ওঠে—ফলে তারা উপসুর হয়ে যায়।

(২) স-টান তারের দুই প্রান্ত-বন্ধে **দৃঢ়তা থেকে বিচ্যুতি,** কম্পাংকের মানে যে তফাৎ ঘটায় তা দু'রকম সর্তাধীনে হতে পারে—(ক) প্রান্ত-বন্ধের (supports) ভর (M') তাদের স্প্রিং-গুণাংকের (s) তুলনায় নগণ্য, (খ) M' খুব বেশী, s খুব কম। প্রথমক্ষেত্রে কম্পাংক $1 : (1 + 2T/sl)$ অনুপাতে কমে এবং দ্বিতীয়ক্ষেত্রে $1 : [1 - 2lT/M'(m\pi r)^2]$ অনুপাতে বাড়ে। প্রথমক্ষেত্রে কম্পাংক-হ্রাস আনুপাতিক হওয়ায় উপসুরগুলি সমমেল থাকে; কিন্তু অন্যটিতে উৎপন্ন সুরের কম্পাংক যত নীচের দিকে, তার শুদ্ধিজনিত বৃদ্ধি তত বেশী—ফলে, তারের স্পন্দন অপর্যাবৃত্ত হয়ে যেতে পারে।

১২-৬. স্পন্দনশীল তারে স্থাণুতরঙ্গ :

এপর্যন্ত তারের স্পন্দনকে δx দৈর্ঘ্যের ছোট ছোট অংশের স্পন্দনসমষ্টি হিসাবে বিবেচনা করা হ'ল—তার এক্ষেত্রে স্পন্দক। আমরা গোড়াতেই বলেছি, তারের এক অনন্য বৈশিষ্ট্য—সে তরঙ্গবাহী মাধ্যমও বটে। এবারে তারের স্পন্দনের বিকল্প বিচার করা হবে—স্থাণুতরঙ্গ সংস্থা হিসাবে।

কোন স্পন্দনক্ষম তারের কোন বিন্দু স্পন্দিত হলেই বিপরীতমুখী যমজ তরঙ্গের উৎপত্তি (9.4a চিত্র) হবে, তারা $\sqrt{T/\mu}$ বেগে তার বরাবর এগোবে, আর তারটির দুই প্রান্ত দৃঢ়ভাবে আটকানো থাকলে, তরঙ্গমালা দুই প্রান্তে প্রতিফলিত হয়ে ফিরে এসে উপরিপাতনের ফলে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি ঘটাবে। প্রান্তদ্বয় অনড় ধ'রে নিলে প্রতিফলিত তরঙ্গের কণাবেগ, কণাসরণ এবং অভিমুখ সবই বিষম হবে। স্পন্দনশীল তারে উৎপন্ন স্থাণুতরঙ্গ বিচার ক'রেও সম্ভাব্য স্পন্দনভঙ্গী এবং কম্পাংকগুলির মান পাওয়া যায়। তারা আগের বিশ্লেষণে লব্ধ ফল থেকে অভিন্ন।

তার বরাবর $+x$ এবং $-x$ অভিমুখী তরঙ্গের সাধারণ সমীকরণ ধরা যাক,

$$y=f(ct-x)+F(ct+x)$$

দ্বিতীয় রাশিটি ডান প্রান্ত-বদ্ধ থেকে প্রতিফলিত তরঙ্গের প্রতিরূপ। তাই ৯-৪.১ থেকে সেই সমীকরণ হবে

$$y=f(ct-x)-f(ct+x)$$

প্রতিফলিত তরঙ্গটি, একমাত্র দিক্‌ ছাড়া আপতিত তরঙ্গের সঙ্গে অভিন্ন। প্রান্তিক সর্তানুসারে, $x=l$ বিন্দুতে সরণ $y=0$; তাই

$$f(ct-l)-f(ct+l)=0$$

$$\therefore \quad f(ct-l)=f(ct+l)=f[(ct-l)+2l] \qquad (১২\text{-}৬.১)$$

অর্থাৎ $f(ct-l)$ এক পর্যাবৃত্ত ফলন এবং $2l$ দূরত্ব পরপর সে পুনরাবৃত্ত হতে থাকে। সুতরাং তারের স্পন্দনও পর্যাবৃত্ত এবং সে-পর্যায়কাল, $2l/c$ হবে। এই সময়ের মধ্যে তরঙ্গ তারের গোটা দৈর্ঘ্য দু'বার অতিক্রম করে, এবং বিপরীতমুখে। তা হলে কম্পাংক হবে

$$n=\frac{c}{2l}=\frac{1}{2l}\sqrt{T/\mu} \qquad (১২\text{-}৬.২)$$

আলোচ্য সচল তরঙ্গ সরল দোলজাতীয় হলে, সরণ-সমীকরণ হবে

$$y=a\sin(\omega t+\beta x)-a\sin(\omega t-\beta x) \qquad (১২\text{-}৬.৩)$$

তাহলে $$y_l=a\sin(\omega t+\beta l)-a\sin(\omega t-\beta l) \qquad (১২\text{-}৬.৩ক)$$

বা $$0=2a\sin\beta l\,.\cos\omega t \qquad (১২\text{-}৬.৩খ)$$

এখন, যেহেতু $a \neq 0$ এবং t-র সব মানেতেই $\cos \omega t = 0$ হতে পারে না, তাই আমরা পাচ্ছি

$$\sin \beta l = 0 \text{ অর্থাৎ } \beta = m\pi/l \; [m = 1, 2, 3, \cdots] \quad (১২\text{-}৬.৪)$$

তাহলে দেখা যাচ্ছে যে, প্রান্তিক সর্ত $y_l = 0$ আরোপ করতেই β-র মান অখণ্ড সংখ্যাভিত্তিক হয়ে পড়ে ; সাধারণভাবে a-র মানও m-নির্ভর হবে।

$$\therefore \quad y_m = a_m \sin(m\pi x/l + \omega_m t) - a_m \sin(\omega_m t - m\pi x/l)$$

$$= 2a_m \cos \omega_m t \sin(m\pi x/l).$$

$$= 2a_m \cos \frac{m\pi ct}{l} \cdot \sin \frac{m\pi x}{l} \quad (১২\text{-}৬.৫)$$

কেননা $\quad \omega_m = 2\pi n_m = 2\pi c/\lambda_m = \beta c = m\pi c/l \quad$ (১২-৬.৬)

সুতরাং তারের m-তম স্পন্দনভঙ্গীতে সরণ এবং স্পন্দনাংক ওপরের দুই সমীকরণ থেকে মেলে। এরা ১২-৪.৩ এবং ১২-৫.১-এর মতোই দাঁড়াচ্ছে। ১২-৬.৫ সমীকরণের দেশাংশ, তারের স্পন্দনশীল আকার এবং কালাংশ, তারের স্পন্দন-প্রকৃতি নির্দেশ করে। স্পন্দনে, এদের একটি যদি সরল দোলীয় হয়, তাহলে অপরটিও তাই হতে বাধ্য।

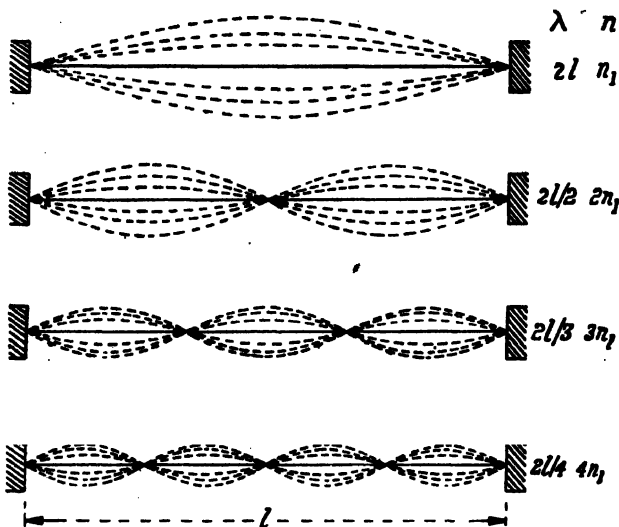
স্পন্দমান তারের x বিন্দুতে দুই বিপরীতমুখী তরঙ্গের $a_m \sin(m\pi ct/l + m\pi x/l)$ এবং $a_m \sin(m\pi ct/l - m\pi x/l)$ উপরিপাতনের ফলে t নিমেষে সরণের মান ১২-৬.৫ সমীকরণ থেকে মিলছে। ঐ বিন্দুতে স্পন্দনবিস্তার

$$R_m = 2a_m \sin m\pi x/l \quad (১২\text{-}৬.৭)$$

স্থানাংক (x)-নির্ভর রাশি। এখন $x = 0$ বা l/m হলে, R_m-এর মান শূন্য হবে। অতএব $m = 0, 1, 2, 3, \ldots$ ইত্যাদি হলে আমরা নিস্পন্দবিন্দুগুলি পাচ্ছি। আবার যদি $x = 2l/m$ ধরি, তাহলে $R_m = 2a_m$ অর্থাৎ চরম স্পন্দনবিস্তার বা সুস্পন্দবিন্দুগুলি আসবে।

তাহলে এই বিশ্লেষণ থেকে সিদ্ধান্ত করা যায় যে, (১) m-তম স্পন্দনরীতিতে তারটি m-সংখ্যক খণ্ডে ভাগ হয়ে স্পন্দিত হবে ; (২) ক্রমিক খণ্ডগুলিতে স্পন্দনদশা বিপরীত ; (৩) তারের স্বভাবী স্পন্দনাংক ω_1, ω_2,

$\omega_4, \cdots$ ইত্যাদি মানের হবে; (৪) স্পন্দনবিস্তারের মান, গোড়ায় প্রযুক্ত শক্তির পরিমাণের ওপর নির্ভর করে।

তারের অনুপ্রস্থ স্পন্দনের রীতি : তারে প্রত্যক্ষ এবং প্রতিফলিত তরঙ্গের উপরিপাতনে স্থাণুতরঙ্গের উদ্ভব হয়। স্পন্দন-কম্পাংক প্রত্যক্ষ তরঙ্গের কম্পাংকের সমান এবং তারের দুই সীমাতেই নিস্পন্দবিন্দু। যে-সব

চিত্র 12.2—তারের সমমেল স্পন্দনরীতি

দৈর্ঘ্যের স্থাণুতরঙ্গের বেলায় তারের দুই প্রান্তবিন্দুতে নিস্পন্দবিন্দু হওয়ার কথা, কেবল তারাই স্থায়ী হবে। মধ্যবর্তী অংশে যেকোন সংখ্যক নিস্পন্দ-বিন্দু থাকতে পারে, কাজেই সেইমতো তরঙ্গদৈর্ঘ্য তথা কম্পাংক সম্ভবপর। এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য দুই সমদশা বিন্দুর মধ্যবর্তী দূরত্ব।

12.2 চিত্রে দুই সীমায় বদ্ধ তারের কয়েকটি সম্ভাব্য স্পন্দনরীতি দেখানো হয়েছে। সরলতম স্পন্দনরীতিতে গোটা তারটাই একটিমাত্র খণ্ডে কাঁপবে, দুই প্রান্তে অনড় তথা নিস্পন্দবিন্দু। তখন $x = l = \frac{1}{2}\lambda_1$; এই λ_1 দীর্ঘতম সম্ভবপর তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং সংশ্লিষ্ট $n_1(=c/2l)$ নিম্নতম সম্ভবপর কম্পাংক, অর্থাৎ তারটির মূল সুর। পরবর্তী রীতিতে দুই খণ্ডে স্পন্দন হবে, কাজেই মধ্যবিন্দুতে তৃতীয় নিস্পন্দবিন্দুটি থাকবে; তখন $\lambda_2 = 2.\frac{1}{2}l_1$ হবে। অনুরূপে তৃতীয় ও চতুর্থ স্পন্দনরীতিতে $\lambda_3 = 2.\frac{1}{3}l$ এবং $\lambda_4 = 2.\frac{1}{4}l$ হবে।

কাজেই m-তম স্পন্দনরীতিতে তারে m-সংখ্যক কম্পনশীল খণ্ড থাকবে এবং $\lambda_m = 2l/m$ হবে।

$$\therefore \quad n_1 = \frac{c}{2l} = \frac{1}{2l} = \sqrt{T/\mu}$$ [১২-৫.২ এবং ১২-৬.২ দেখ]

তাহলে পরপর উপসুরগুলির (এখানে তারা সমমেল) কম্পাংগুলি হবে যথাক্রমে

$$n_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{c}{2l/2} = 2 \cdot \frac{c}{2l} = 2n_1$$

$$n_3 = \frac{c}{\lambda_3} = \frac{c}{2l/3} = 3 \cdot \frac{c}{2l} = 3n_1$$

$$n_4 = \frac{c}{\lambda_4} = \frac{c}{2l/4} = 4 \cdot \frac{c}{2l} = 4n_1$$

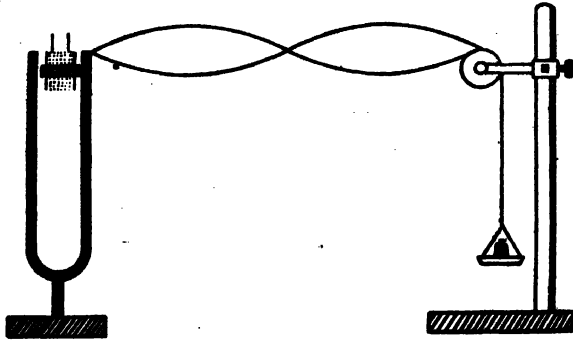
$$n_m = \frac{c}{\lambda_m} = \frac{c}{2l/m} = m\,\frac{c}{2l} = mn_1$$

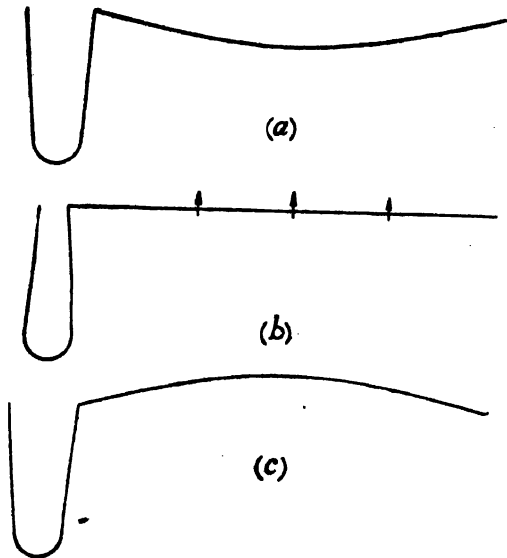
তারে স্থাণুতরঙ্গের প্রদর্শন-ব্যবস্থা : মেলডি-র পরীক্ষা : আগে (§ ৫-১৩) এই পরীক্ষা বর্ণিত হয়েছে। সুরশলাকার স্পন্দন, সুতোর অবস্থান-সাপেক্ষে অনুপ্রস্থ বা অনুদৈর্ঘ্য হতে পারে। সুতোয় লুপের সংখ্যা তুলাপাত্রসহ ভার এবং শলাকার স্পন্দনভঙ্গীর ওপর নির্ভর করবে। ভার অপরিবর্তিত রেখে, সুতোর দৈর্ঘ্য বদ্‌লে বদ্‌লে বা দৈর্ঘ্য অক্ষুণ্ণ রেখে ভার বদ্‌লে, নানা কম্পাংকের অনুনাদী স্পন্দন ঘটানো যায়।

অনুপ্রস্থ রীতিতে স্পন্দন (চিত্র 5.13) ঘটালে, তারে যদি m-সংখ্যক খণ্ড উৎপন্ন হয়, তাহলে সুরশলাকার কম্পাংকে প্রযোজ্য সম্পর্কটি হবে

$$n = \frac{c}{\lambda_m} = \frac{c}{2l/m} = \frac{m}{2l}\sqrt{T/\mu}$$

এখন কোন একটি নির্দিষ্ট ব্যবস্থায় n, l, μ অচররাশি ; সুতরাং $Tm^2 =$ ধ্রুবক হবে। কাজেই $1, 2, 3, \cdots m$, ইত্যাদি সংখ্যক খণ্ডে তারকে কাঁপাতে প্রয়োজনীয় ভারগুলি $\sqrt{1}$, $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}, \cdots \sqrt{m}$ অনুপাতে হবে। তারের যে প্রান্ত সুরশলাকার বাহুবদ্ধ, সেখানে তো আর নিস্পন্দবিন্দু হতে পারে না ; সেটি হবে সামান্য একটু ভেতরের দিকে। তাই সুতোর কার্যকর দৈর্ঘ্য (l) তার আসল দৈর্ঘ্যের চেয়ে সামান্য কম।

অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনরীতিতে (চিত্র 12.3) অনুনাদী কম্পনে সুতোর কম্পাংক সুরশলাকার কম্পাংকের অর্ধেক ; এইরকম অনুনাদী কম্পনে

চিত্র 12.3—মেল্‌ডি-র পরীক্ষার সুতোর অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনরীতি

সুতোর কম্পাংক সুরশলাকার কম্পাংকের অর্ধেক ; 12.4 চিত্রে ব্যাখ্যা করা হয়েছে, কেন তা হবে। কম্পমান বাহু যখন বাইরের দিকে সরণপ্রান্তে, সুতো তখন (a) ঝুলে পড়েছে ; সে যখন ভেতরের দিকে চলা সুরু করছে তখন

চিত্র 12.4—সুতোর অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের রূপরেখা

সুতোর টান পড়ায়, সুতো ওপরে উঠতে সুরু করবে ; বাহু যখন একেবারে ভেতরের সরণপ্রান্তে, সুতোয় তখন (b) চরম টান, সে অনুভূমিক এবং ঊর্ধ্বমুখী।

এবারে বাহু বহির্মুখী, গতিজড়তার দরুন সুতো উঠতেই থাকবে, যতক্ষণ না (c) বাহু বাইরের দিকে সরণপ্রান্তে পৌঁছয়। অতএব শলাকা যতক্ষণে একটা কম্পন পূর্ণ করছে, সুতোর ততক্ষণে অর্ধকম্পন হবে। তাহলে, সুতোর m-সংখ্যক লুপ হয়ে থাকলে

$$n=\frac{m}{l}\sqrt{T/\mu}$$

সম্পর্কটি কার্যকর হবে। এখানেও mT^2 ধ্রুবক, তবে অনুপ্রস্থ স্পন্দনের সমসংখ্যক লুপ পেতে তার মাত্র $\frac{1}{4}$ পরিমাণ ভার হলেই চলবে।

১২-৭. স্পন্দনশীল তারের কম্পাংক সূত্রাবলী :

দুই প্রান্তে দৃঢ়ভাবে বাঁধা তার সমগ্রভাবে কাঁপতে থাকলে, আমরা ১২-৬.২ সমীকরণ থেকে উৎপন্ন মূল সুরের কম্পাংক পেয়েছি

$$n_1=\frac{1}{2l}\sqrt{T/\mu} \qquad (১২\text{-}৭.১)$$

তাই থেকে আমরা তারের কম্পনের তিনটি সূত্র পাই—

(১) **দৈর্ঘ্যের সূত্র :** তারের টান এবং রৈখিক ভর অক্ষুণ্ণ থাকলে, তারের কম্পাংক দৈর্ঘ্যের ব্যস্তানুপাতিক ; অর্থাৎ যদি T এবং μ না বদ্‌লায় তাহলে $n \propto 1/l$।

(২) **টানের সূত্র :** তারের দৈর্ঘ্য এবং রৈখিক ভর অক্ষুণ্ণ থাকলে, তারের কম্পাংক টানের বর্গমূলের সমানুপাতিক ; অর্থাৎ যদি l এবং μ না বদ্‌লায় তাহলে $n \propto \sqrt{T}$।

(৩) **ভরের সূত্র :** তারের দৈর্ঘ্য এবং টান অক্ষুণ্ণ থাকলে, তারের কম্পাংক রৈখিক ভরের বর্গমূলের ব্যস্তানুপাতিক ; অর্থাৎ যদি l এবং T না বদ্‌লায় তাহলে $n \propto 1/\sqrt{\mu}$।

আবিষ্কারকের নামানুসারে এদের **মার্সেন-এর সূত্রাবলী** (১৬৩৬) বলে। তত্ত্ব থেকে এদের প্রথম গাণিতীয় ব্যুৎপত্তি করেন (১৭৩৫) টেলর। তারের প্রস্থচ্ছেদ গোলাকার হলে, লেখা যায়

$$n=\frac{1}{2l}(T/\mu)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{2l}\left(\frac{T}{\pi r^2 .1.\rho}\right)^{\frac{1}{2}}=\frac{1}{ld}\sqrt{T/\rho\pi} \qquad (১২\text{-}৭.২)$$

সুতরাং গোল প্রস্থচ্ছেদের সুষম তারের বেলায় স্পন্দনের ভরসূত্রটিকে ভেঙে আরও দুটি সম্পর্ক মেলে—

(৩ক) **ব্যাসের সূত্র :** তারের দৈর্ঘ্য, টান এবং উপাদান না বদ্‌লালে তারের ব্যাসের ব্যস্তানুপাতে কম্পাংক বদ্‌লায় ; অর্থাৎ যদি l, T এবং ρ অক্ষুন্ন থাকে তাহলে $n \propto 1/d$ ।

(৩খ) **ঘনত্বের সূত্র :** তারের দৈর্ঘ্য, ব্যাস এবং টান না বদ্‌লালে তারের উপাদানের ভর-ঘনত্বের বর্গমূলের ব্যস্তানুপাতে কম্পাংক বদ্‌লায় ; অর্থাৎ যদি l, d, T অক্ষুন্ন থাকে তাহলে $n \propto 1/\sqrt{\rho}$ ।

উদাহরণ : দুই অভিন্ন তারের প্রতিটিতে 5 কেজি-ভার টান দিলে কম্পাংক 300/সে হয়। তাদের একটিতে টান 100 গ্র্যাম-ভার বাড়ালে দুয়ের মধ্যে স্বরকম্পের সংখ্যা কত হবে ? ($g = 980$ সেমি/সে²)

সমাধান : দুটি তারেই প্রাথমিক টান 5000 গ্রাম-ভার। তাদের একটিতে টান বাড়ালে তার কম্পাংক সামান্য বাড়বে। এখন ১২-৭.১ থেকে অবকলন ক'রে পাব

$$dn = -dl + \tfrac{1}{2}\, dT - \tfrac{1}{2} d\mu$$

তাহলে কম্পাংকের আনুপাতিক পরিবর্তন হবে

$$\frac{dn}{n} = \frac{1}{2}\frac{dT}{T} - \frac{1}{2}\frac{d\mu}{\mu} - \frac{dl}{l}$$

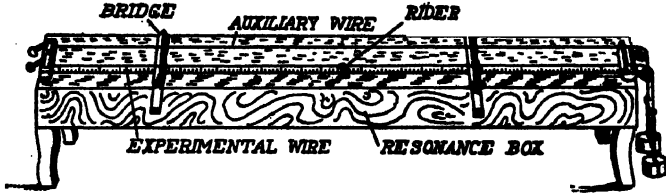
যেহেতু এক্ষেত্রে μ বা l কেউই বদ্‌লাচ্ছে না, তাই এখানে

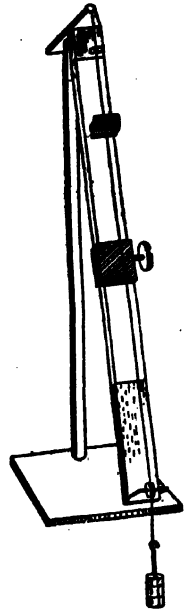
$$\frac{dn}{300} = \frac{1}{2} \cdot \frac{100}{5000}$$

∴ নির্ণেয় স্বরকম্পের সংখ্যা $= dn = 300 \times 0.01 = 3$ চক্র/সে

সনোমিটার : মার্সেন-এর সূত্রাবলী যাচাই করতে এবং সুরশলাকার কম্পাংক মাপতে এই যন্ত্রটি (চিত্র 12.5) ব্যবহার হয়ে থাকে। যন্ত্র দু'রকমের হয়—অনুভূমিক এবং উল্লম্ব।

অনুভূমিক সনোমিটার (চিত্র 12.5a) মোটামুটিভাবে একটি চৌপায়া, লম্বা, ফাঁপা কাঠের বাক্স। তার গায়ে কয়েকটি ফুটো থাকে ; তাদের মাধ্যমে বাইরের হাওয়ার সঙ্গে বাক্সের ভেতরের বায়ুর যোগ থাকে। বাক্সের এক প্রান্তে

দুটি গোঁজ (peg), আর অপর প্রান্তে দুটি পুলি থাকে। এদের ওপর দিয়ে অনুভূমিক তার টানা থাকে ; প্রান্তে ওজন ঝুলিয়ে তারটিকে স-টান রাখা হয়। দুটি সেতু (bridge) বা প্রিজ্‌মাকৃতি কাঠের টুক্‌রো স্পন্দনশীল তারের দৈর্ঘ্য নির্দিষ্ট রাখে। যন্ত্রটিকে একতারাও (Monochord) বলে। তারের ওপরে

চিত্র 12.5(*a*)—অনুভূমিক সনোমিটার

মিটার-স্কেল খাড়াভাবে দাঁড় করিয়ে প্রিজ্‌মের শীর্ষে দুই ক্ষুরধারের মধ্যবর্তী দূরত্ব মাপা হয়। এটিই স্পন্দনশীল তারের দৈর্ঘ্য। স্পন্দনশীল সুরশলাকার হাতলটি সনোমিটারের বাক্সের ওপরে চেপে ধ'রে একটি সেতু অল্প অল্প ক'রে সরানো হয়, যতক্ষণ না তারের ওপর সোয়ার (rider) হিসাবে রাখা ছোট্ট কাগজের টুকরোটি ছিট্‌কে পড়ে যায় ; সুরশলাকার স্পন্দন তখন তারে পরবশ অনুনাদী কম্পন সৃষ্টি করেছে। এইবার ১২-৭.১ সমীকরণ প্রয়োগ করলে সুরশলাকার কম্পাংক বেরোয়। একটি তারের বিভিন্ন দৈর্ঘ্যে অনুনাদ ঘটিয়ে তারের কম্পনের দৈর্ঘ্যের সূত্র যাচাই করা হয়। টান ও ভরের সূত্র যাচাই করতে দ্বিতীয় বা আনুষঙ্গিক (auxiliary) তারটির দরকার।

বেশী সূক্ষ্মতা অর্জনের উদ্দেশ্যে **উল্লম্ব স্বনমাপী** (চিত্র 12.5*b*) ব্যবহার করা হয়। সেতু আর পুলিতে যথেষ্ট ঘর্ষণ থাকায়, প্রযুক্ত টানেতে অনেকটাই অনিশ্চয়তা আসে। তাই বিজ্ঞানী ডাই কাঠের পাটাতনটিকে হেলিয়ে বসিয়েছেন। ছোট্ট দুটি ইস্পাতের বলের মধ্যে তারের ওপরের প্রান্তটি শক্ত ক'রে চেপে ধরা থাকে, আর অপর প্রান্তটি একটা পুলির ওপর দিয়ে গিয়ে ওজন-দাঁড়ির হুকে আবদ্ধ। পাটাতনের মাঝামাঝি জায়গায় ছোট্ট চাকা-লাগানো একটি আসন—সেটিই সনোমিটারের সেতুর কাজ করে। এতে দুটি সূচক লাগানো

চিত্র 12.5(*b*)—উল্লম্ব স্বনমাপী

থাকে, তারা একটি স্কেলের ওপর দিয়ে ওঠে বা নামে ; স্কেলটি সরাসরি কম্পাংকে অংশাংকিত। তারের ওপরদিকের আটকানো বিন্দুটি নিশ্চল এবং আসনটি সচল নিস্পন্দবিন্দু—কারণ স্ক্রুর সাহায্যে তাকে পাটাতনের যেকোন জায়গায় আটকানো যায়। তারটি দুর্বল প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারাবাহী এবং সরণক্ষম এক তড়িৎচুম্বকের দুই মেরুর মধ্যে দিয়ে বিস্তৃত। যখন দুই আটক-বিন্দুর মধ্যে দূরত্ব এমন যে, তারটির এক বা একাধিক লুপের কম্পাংক পরীক্ষাধীন স্বনকের সমান, তখন অনুনাদী স্পন্দন হয়। প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার ওপর চুম্বকের ক্রিয়াতেই তারটি কাঁপে। চুম্বকের অবস্থানের ওপরেই লুপের সংখ্যা নির্ভর করে এবং এই সংখ্যা 10 পর্যন্ত করা সম্ভবপর। একটি মাত্র লুপে কম্পাংকপাল্লা 200 থেকে 400 হাৎ'জ/সে এবং দশটির বেলায় সেই পাল্লা 2 থেকে 10 কিলোহাৎ'জ। এই যন্ত্রে মাপন-সূক্ষ্মতা 0.001% পর্যন্ত পৌঁছেছে।

অনুভূমিক সনোমিটারে (ক) দুই সেতুর বিচ্ছেদ অক্ষুণ্ণ রেখে, টান-ভার বদল ক'রে, কিম্বা (খ) টান-ভার স্থির রেখে, দুই সেতুর মধ্যে দূরত্ব বদ্‌লে বদ্‌লে তারের কম্পাংক পালটানো হয়। কম্পাংক নির্ণয় করতে পরীক্ষাধীন স্বনকের সঙ্গে তারের কম্পনসমতা (unison) বা **সমতান** আনা হয়। স্বনমাপী দিয়ে 12.2 চিত্রের সব-ক'টি স্পন্দনরীতিই অনায়াসে দেখানো যায় ; পূর্ণ এক খণ্ডে স্পন্দমান তারের মধ্যবিন্দুতে খুব আল্‌তোভাবে ছুঁয়ে দুটি, এক-তৃতীয়াংশ দৈর্ঘ্যে ছুঁয়ে তিনটি, এক-চতুর্থাংশ দৈর্ঘ্যে ছুঁয়ে চারটি লুপে, স্থাণুকম্পন উদ্দীপিত করা যায়। সরণ-নিস্পন্দবিন্দুগুলির মধ্যে দিয়ে স্পন্দন বজায় রাখার শক্তি সঞ্চারিত হয় ব'লে সেখানে সামান্য স্পন্দন হয়ই (এই প্রসঙ্গে ৫-১৫ অনুচ্ছেদের আলোচনাও দেখ)। তরঙ্গবেগ সরণবিস্তার-নির্ভর ব'লেই এই যৎসামান্য কম্পন ঘটে। এই স্পন্দন, প্রকৃতিতে অনুদৈর্ঘ্য এবং তারের অন্যান্য অংশের স্পন্দন থেকে $T/4$ কালান্তরে হয়ে থাকে।

১২-৮. তারে স্পন্দনশক্তি :

অন্য সব স্পন্দনের মতই স্পন্দনশীল তারের যেকোন নিমেষে মোট শক্তি গতি- ও স্থিতি-শক্তির যোগফল। কোন নিমেষে তারের কোন এক বিন্দুর সরণ যদি y হয়, তাহলে এর গতিশক্তি, বিভিন্ন রীতিতে সরণের কালান্তর-হারের $(\partial y/\partial t)$ সমাহার এবং স্থিতিশক্তি, সরণের দেশান্তর-হারের $(\partial y/\partial x)$ ওপর নির্ভরশীল। ১২-৪.৪ সমীকরণ থেকে পাওয়া যাবে—

$$y = \sum_{m=1}^{m=\infty} R_m \cos(\omega_m t - \phi_m) \sin \frac{m\pi x}{l}$$

$$= \sum_{m=1}^{m=\infty} Y_m \sin \frac{m\pi x}{l} \qquad (১২\text{-}৮.১)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial y}{\partial t} = \sum_{m=1}^{m=\infty} -\omega_m R_m \sin(\omega_m t - \phi_m) \sin \frac{m\pi x}{l}$$

$$= \sum_{m=1}^{m=\infty} \dot{Y}_m \sin \frac{m\pi x}{l} \qquad (১২\text{-}৮.২)$$

এবং $$\frac{\partial Y}{\partial x} = \sum_{m=1}^{m=\infty} Y_m \frac{m\pi}{l} \cos \frac{m\pi x}{l} \qquad (১২\text{-}৮.৩)$$

এখানে তারের রৈখিক ভর μ $(=M/l)$ ধরলে, dx দৈর্ঘ্যাংশের ভর μdx হবে। তাহলে তারের গতিশক্তি হবে—

$$E_K = \tfrac{1}{2}\int_0^l \mu\, dx \left(\frac{\partial Y}{\partial t}\right)^2 = \frac{\mu}{2}\int_0^l \sum_{m=1}^{m=\infty} \dot{Y}_m^2 \sin^2 \frac{m\pi x}{l} dx$$

$$= \frac{\mu}{4} \sum_{m=1}^{m=\infty} \dot{Y}_m^2 \int_0^l \left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{l}\right) dx$$

$$= \frac{\mu}{4} \sum_{m=1}^{m=\infty} \dot{Y}_m^2 \int_0^l dx \quad \left[\because \int_0^l \cos 2m\pi x/l = 0\right]$$

$$= \frac{\mu l}{4} \sum_{m=1}^{m=\infty} \dot{Y}_m^2 = \frac{\mu l}{4} \sum_{m=1}^{m=\infty} \omega_m^2 R_m^2 \sin^2(\omega_m t - \phi_m)$$

$$(১২\text{-}৮.৪)$$

আবার 12.1 চিত্রে দেখি, টানের ফলে δx অংশ বেড়ে δl হয়েছে।

$$\therefore \delta l = \sqrt{(\delta x)^2 + (\delta y)^2} \simeq \delta x \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

অর্থাৎ দৈর্ঘ্যবৃদ্ধি $= \delta l - \delta x = \frac{1}{2}\, \delta x \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2$

T টানের ক্রিয়ায় এই দৈর্ঘ্যবৃদ্ধি ঘটেছে। সুতরাং সেই অংশটুকুর স্থিতিশক্তি (বল × সরণ) হবে

$$\delta E_P = T.\tfrac{1}{2}\,\delta x\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2$$

অতএব গোটা তারের মোট স্থিতিশক্তি দাঁড়াবে

$$E_P = \Sigma\delta E_P = \frac{T}{2}\int_0^l\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2\cdot dx$$

$$= \frac{T}{2}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{m^2\pi^2}{l^2}\cdot Y_m^2\int_0^l \cos^2\frac{m\pi x}{l}\,dx$$

$$= \frac{T}{4}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{m^2\pi^2}{l^2}\cdot Y_m^2\int_0^l\left(1+\cos\frac{2m\pi x}{l}\right)dx$$

$$= \frac{T}{4}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{m^2\pi^2}{l^2}\cdot Y_m^2.l = \frac{T}{4l}\sum_{m=1}^{m=\infty}Y_n^2\,\frac{\omega_m^2 l^2}{c^2}$$

(১২-৬.৬ থেকে)

$$= \frac{T}{4l}\cdot\frac{l^2}{T/\mu}\cdot\sum_{m=1}Y_m^2\,\omega_m^2$$

$$= \frac{\mu l}{4}\sum_{m=1}^{m=\infty}Y_m^2\,\omega_m^2 \qquad (১২\text{-}৮.৫)$$

∴ তারের মোট স্পন্দনশক্তি

$$E_K + E_P = \tfrac{1}{4}\mu l\sum_{m=1}^{m=\infty}(\dot{Y}_m^2 + Y_m^2\omega_m^2)$$

$$= \tfrac{1}{4}M\sum_{m=1}^{m=\infty}(\dot{Y}_m^2 + Y_m^2\omega_m) \qquad (১২\text{-}৮.৭)$$

অর্থাৎ মোট কম্পনশক্তি অসংখ্য রাশির ($m=1$ থেকে $m=\infty$) সমষ্টি, তাদের প্রতিটি একটিমাত্র স্পন্দনরীতির সঙ্গে সংশ্লিষ্ট।

তারের স্বভাবী নির্দেশাংক বা স্থানাংক : Y_m সংখ্যাটি এই সমীকরণে বিশেষ তাৎপর্যপূর্ণ ; একেই তারের স্বভাবী স্থানাংক (§৪-৫ক দেখ) বা নির্দেশাংক বলে। যেকোন তারকেই অসংখ্য কণাস্পন্দকের যুগ-যোজিত

(tightly coupled) সংস্থা বলা চলে। কাজেই তারের অসংখ্য স্পন্দনরীতি এবং স্বভাবী নির্দেশাংক থাকার কথা ; ω_m সেই অসংখ্য স্পন্দনাংক ও স্বভাবী স্থানাংক নির্দেশ করছে। ৪-৯ অনুচ্ছেদে আমরা ভরহীন তারে দুটি সুনির্দিষ্ট ও সুবিন্যস্ত কণাস্পন্দক বসিয়েছিলাম, স্পন্দনশীল তারকে এরই ব্যাপকতর আকার (extension) ব'লে ধরে নিতে পারি।

১২-৯. বাস্তব তারে স্পন্দন-উদ্দীপন ও রীতি :

তারের প্রান্তবিন্দুতে বা অন্যত্র, পরবশ স্পন্দন ঘটিয়ে স্পন্দন-উদ্দীপন করা যায়। মেল্ডি-র পরীক্ষা প্রথম রীতির এবং ডাই-উদ্ভাবিত খাড়া সনোমিটারে বিদ্যুৎ-চুম্বকের সাহায্যে যেকোন বিন্দুতে স্পন্দন-উদ্দীপন, দ্বিতীয় রীতির উদ্দীপন পন্থা। এ ছাড়া, দুই প্রান্তে আবদ্ধ তারের যেকোন বিন্দুতে, টংকার দিয়ে বা আঘাত ক'রে কিম্বা ছড় টেনে স্থাণুকম্পন উদ্দীপিত করা হয়।

কোন তারে কিন্তু, একটিমাত্র রীতিতে স্পন্দন উদ্দীপিত করা প্রায় অসম্ভব ; কেবলমাত্র উপযুক্ত কম্পাংকে অনুনাদী স্পন্দন ঘটিয়েই তা করা যায়। সাধারণভাবে কোন তারকে স্পন্দিত করলে একসঙ্গে একাধিক স্পন্দনরীতি থাকবেই। 12.6 চিত্রে এক সঙ্গে মূল ও প্রথম সমমেলের কম্পাংকে স্পন্দনরত

চিত্র 12.6—তারে একযোগে একাধিক স্পন্দনরীতি

একটি তার দেখানো হয়েছে। তাদের মধ্যে যেকোন একটি রীতি প্রাধান্য পেলেও (যেমন চিত্রে মূল সুরটি) অন্যেরাও থাকে।

স্পন্দনশীল তার কি কি রীতিতে কাঁপবে তা বিচলিত বিন্দুর স্থানাংকের ওপরেই নির্ভর করে। p ($=1, 2, 3$ প্রভৃতি) ক্ষুদ্র অখণ্ড সাংখ্যমান আর তারের দৈর্ঘ্য l হলে, যদি উদ্দীপন-বিন্দু আবদ্ধপ্রান্ত থেকে l/p দূরত্বে থাকে, তবে যে যে স্পন্দনরীতিতে ঐ বিন্দু নিস্পন্দ হওয়ার কথা, তারা কেউই থাকতে পারে না ; অর্থাৎ মূল কম্পাংক n হলে, np কম্পাংকের সব-ক'টি সমমেলই অনুপস্থিত থাকবে ; যেমন— তারের মধ্যবিন্দুতে উদ্দীপন হলে, যুগ্ম সমমেলগুলি থাকবে না। আবার একটি

মাত্র খণ্ডে স্পন্দন হতে থাকা-কালে তারের কোন বিন্দুকে আলতোভাবে ছুঁলে, ঐ বিন্দুতে যে যে স্পন্দনরীতিতে নিস্পন্দবিন্দু থাকার কথা, তারাই শুধু থাকে (১২-৭ অনুচ্ছেদের শেষ প্যারাটি দেখ)। দুই প্রান্তে আবদ্ধ তারে স্পন্দনরীতির সংখ্যানিয়ন্ত্রণের এই বিধিকে **ইয়ং-হেল্ম্‌হোল্‌ৎজ সূত্র** বলে। এই নীতি-বশেই মধ্যবিন্দুতে উদ্দীপিত তারে বিজোড় সমমেলগুলিই মাত্র থাকে। এই অবস্থায় তারটি $l/3$ বিন্দুতে ছুঁলে, কেবল তৃতীয়, নবম ইত্যাদি সমমেলগুলিই থাকবে।

উদ্দীপনরীতির ওপরেই উৎপন্ন সমমেলগুলির সংখ্যা, স্পন্দনবিস্তার এবং প্রকৃতি নির্ভর করে। আবার তাদের, বিশেষ ক'রে উপসুরগুলির আপেক্ষিক স্পন্দনবিস্তারের ওপর, উৎপন্ন স্বরের (note) বা সুরেলা শব্দের জাতিবৈশিষ্ট্য নির্ভর করে। সমমেল এবং উপসুরগুলির সংখ্যা যত বাড়ে, অর্থাৎ একযোগে স্পন্দনরীতির সংখ্যা যত বেশী হয়, উৎপন্ন শব্দ ততই সুরেলা ও শ্রুতিমধুর হয়। স্বভাবতই সে অবস্থায় তারের স্পন্দনরীতি ততই জটিলতর।

১২-১০. তারের জটিল স্পন্দনের গাণিতীয় বিশ্লেষণ : ফুরিয়ার-সহগ নির্ণয় :

একযোগে একাধিক রীতিতে স্পন্দমান তারের জটিল স্পন্দন ১২-৪.৪ বা ১২-৬.৫ সমীকরণের সাহায্যে প্রকাশ করা সম্ভব। তারের বিভিন্ন বিন্দুতে প্রাথমিক সরণ এবং বেগ থেকে এই সম্পর্কগুলির ফুরিয়ার-সহগদের (a_m, b_m, R_m) মান মেলে। তারের জটিল স্পন্দনের বিশ্লেষণে, বিধিবদ্ধ (*eigen*) ফলনের দুই বিশেষ ধর্ম, সমকোণীয়তা (orthogonality) এবং সম্পূর্ণতা (completeness) কাজে লাগে।

(১) দুই বিধিবদ্ধ ফলনের গুণফলের নিশ্চিত (definite) সমাকলের মান যদি স্বাধীন (independent) চলকের গ্রাহ্য (admissible) পাল্লার মধ্যে শূন্য হয়, তাহলে ফলন-দুটিকে পরস্পর **সমকোণীয়** বলা হয়। স্পষ্টতই ১০-১১ অনুচ্ছেদের সমাকলন-তালিকার চতুর্থ ফল থেকে

$$m \neq n \text{ হলে, } \int_0^l \sin(m\pi x/l).\ \sin(n\pi x/l).\ dx = 0$$

(২) যদি কোন স্বেচ্ছিক ফলন $f(x)$ একপ্রস্ত (set) বিধিবদ্ধ ফলনের (*eigenfunction*) সঙ্গে একই প্রান্তিক-সর্ত-শাসিত হয় এবং তাকে

$$f(x) = \sum_{m=1}^{m=\infty} a_m\, S_m(x)$$

আকারে (a_m ধ্রুবসহগ, S_m বিধিবদ্ধ ফলন) প্রসারিত করা যায়, তাহলে বিধিবদ্ধ ফলনের সেই প্রস্তকে সম্পূর্ণ বলে।

বিশ্লেষণ: ধরা যাক, স-টান তারের x বিন্দুতে t নিমেষে অনুপ্রস্থ সরণ y; অর্থাৎ

$$y_{(x,t)} = \sum_{m=1}^{m=\infty} (a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t) \sin \frac{m\pi x}{l}$$

এবং বেগ $\dot{y}_{(x,t)} = \sum_{m=1}^{m=\infty} \sin \frac{m\pi x}{l} (-\omega_m a_m \sin\omega_m t + \omega_m b_m \cos\omega_m t)$

সুরুর মুহূর্তে কোন বিন্দুতে $y_{(x,0)} = \sum_{m=1}^{m=\infty} a_m \sin \frac{m\pi x}{l}$ (১২-১০.১)

এবং $$\dot{y}_{(x,0)} = \sum_{m=1}^{m=\infty} \omega_m b_m \sin \frac{m\pi x}{l}$$

$$= \frac{\pi c}{l} \sum_{m=1}^{m=\infty} m b_m \sin \frac{m\pi x}{l} \qquad (১২\text{-}১০.২)$$

দেখ যে, $y_{(x,0)}$ এবং $\dot{y}_{(x,0)}$ ফলন-দুটি, বিধিবদ্ধ ফলন $\sin(m\pi x/l)$-এর সরল ফুরিয়ার-প্রসারণ। তারের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে আদি সরণ এবং বেগ $y_{(x,0)}$ এবং $\dot{y}_{(x,0)}$ কেবল x-নির্ভর।

ফুরিয়ার-সহগ a_m এবং b_m বার করতে ১২-১০.১ এবং ১২-১০.২-কে দু'ধারে $\sin n\pi x/l$ দিয়ে গুণ ক'রে $x=0$ থেকে $x=l$ পর্যন্ত সমাকলন করতে হবে। m-এর সম্ভবপর সব মানই হতে পারে, কিন্তু n-এর যেকোন একটি অখণ্ড সাংখ্যমান $(1, 2, 3, \cdots)$ ছাড়া হতে পারে না; তাহলে,

$$\int_0^l y_0 \sin \frac{n\pi x}{l} \cdot dx = \int_0^l \sum_{m=1}^{m=\infty} a_m \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \frac{n\pi x}{l}\, dx$$

ডানদিকের ফলনগুলির সমকোণীয়তার জন্যে, কেবল $m=n$ মানের সমাকলটিই থাকবে, অন্যগুলি শূন্য হবে।

$$\therefore \int_0^l y_0 \sin \frac{m\pi x}{l}\, dx = a_m \int_0^l \sin^2 \frac{m\pi x}{l}\, dx = a_m \cdot \tfrac{1}{2} l$$

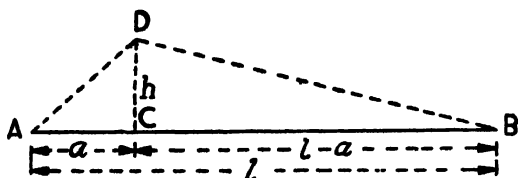
$$\therefore a_m = \frac{2}{l} \int_0^l y_0 \sin \frac{m\pi x}{l}\, dx \qquad (১২\text{-}১০.৩)$$

অনুরূপে ১২-১০.২ থেকে পাব

$$b_m = \frac{2}{m\pi c}\int_0^l y_0 \sin\frac{m\pi x}{l}\,dx \qquad (১২\text{-}১০.৪)$$

স্বভাবতই সহগ-দুটির প্রকৃত মান, উদ্দীপনরীতি অর্থাৎ তারে লুপের সংখ্যার ওপর নির্ভর করবে।

১২-১১. টংকারিত তার (Plucked string):

দুই প্রান্তে আবদ্ধ স-টান তারের কোন বিন্দুকে অনুপ্রস্থ দিকে টেনে সরিয়ে, ছেড়ে দিলে যে শব্দ হয়, তাকে টংকার বলে। ধনুর ছিলা আকর্ণ টেনে, তীর ছুঁড়ে দিলে ধনু বা "পিণাকেতে জাগে টংকার"। অধ্যায়ের গোড়াতেই বলা হয়েছে যে, তারবাদ্যের উৎপত্তি সম্ভবত এই থেকেই হয়েছিল।

চিত্র 12.7—টংকারিত তার

12.7 চিত্রে দুই প্রান্তে আবদ্ধ আদর্শ স-টান তার $AB\ (=l)$ x-অক্ষ বরাবর রাখা আছে। মূলবিন্দু $A\ (x=0)$ থেকে a দূরত্বে C বিন্দুকে আড়াআড়ি দিকে D পর্যন্ত h দূরত্ব টানা হ'ল; h-এর মান এত কম যে, তার বরাবর টান T যেন অপরিবর্তিত থাকে। আদি মুহূর্তে $(t=0)$ তারের স্থানাংকন-রেখার (ADB) গণিতীয় প্রতিরূপ হবে (প্রথম সর্ত)—

$$(১)\quad y_0 = \begin{vmatrix} hx/a & [0<x<a] \\ h(l-x)/(l-a) & [a<x<l] \end{vmatrix} \qquad (১২\text{-}১১.১)$$

অর্থাৎ $x=a$ দৈর্ঘ্যের মধ্যে তারের যেকোন বিন্দুর সরণ $(y_0/x) = (h/a)$*-সম্পর্ক দিয়ে নির্দিষ্ট হবে; আর $x=a$ থেকে $x=l$ অর্থাৎ BC দৈর্ঘ্যের মধ্যে যেকোন বিন্দুর সরণ $[y_0/(l-x)] = [h/(l-a)]$ সম্পর্ক থেকে পাওয়া যাবে।

---

* AD-র ওপর যেকোন বিন্দু E ধরে নিয়ে, AC-র ওপর EF লম্ব কল্পনা কর। লম্বের দৈর্ঘ্য y_0, পাদবিন্দুর স্থানাংক x; তাহলে AEF এবং ADC সদৃশ ত্রিভুজ থেকে এই সম্পর্ক আসে। তারের অপর অংশেও অনুরূপভাবে দ্বিতীয় সম্পর্ক আসবে।

এ ছাড়া দ্বিতীয় সর্ত হবে—সুরুতে তারের প্রতিটি কণাই স্থির, অর্থাৎ

$$(২) \qquad \dot{y}_0=0 \quad (0<x<l) \qquad (১২\text{-}১১.২)$$

এবারে, বিচলিত বিন্দুটি ছেড়ে দিলে তারটি স্পন্দিত হতে থাকবে (স্পন্দন বাধারহিত ধরা হবে) এবং তা থেকে সুরেলা শব্দ হতে থাকবে। এখন ১২-১০.১ এবং ১২-১০.২ সমীকরণ অনুযায়ী

$$y_{(x,0)}=\sum_{m=1} a_m \sin\frac{m\pi x}{l} \text{ এবং } \dot{y}_{(x,0)}=\sum_{m=1}^{m=\infty}\omega_m b_m \sin\frac{m\pi x}{l}$$

এখন, যেহেতু প্রান্তিক সর্তানুসারে $\dot{y}_0=0$, আমরা পাব $b_m=0$, কেননা $\omega_m\neq 0, l\neq 0$;

অতএব কোন এক নিমেষে তারের যেকোন এক বিন্দুর সরণ হবে

$$y_{(x,t)}=\sum_{m=1}^{m=\infty} a_m \cos\omega_m t \sin\frac{m\pi x}{l} \qquad (১২\text{-}১১.৩)$$

আবার ১২-১০.৩ সমীকরণটি থেকে

$$a_m=\frac{2}{l}\int_0^l y_0 \sin\frac{m\pi x}{l}dx$$

$$=\frac{2}{l}\left[\int_0^a \frac{h}{a}x\sin\frac{m\pi x}{l}dx+\int_a^l\frac{h}{l-a}(l-x)\sin\frac{m\pi x}{l}dx\right]$$

$$=\frac{2h}{l}\left[\frac{1}{a}\int_0^a x\sin\frac{m\pi x}{l}dx+\frac{1}{l-a}\int_a^l(l-x)\sin\frac{m\pi x}{l}dx\right]$$

যে দুটি নিশ্চিত (definite) সমাকল এলো, তাদের খণ্ড (by parts) সমাকলন করতে হবে। এখন $(m\pi x/l)$ রাশিটিকে k ধরলে, পাব

$$(১)\int x\sin kx.\,dx=-\frac{x}{k}\cos x+\int\frac{\cos kx}{k}dx$$

$$=-\frac{x\cos kx}{k}+\frac{\sin kx}{k^2}+C_1$$

$$(২)\int(l-x).\sin kx\,dx$$

$$=(l-x).\left(\frac{-\cos kx}{k}\right)-\int\frac{\cos kx}{k}dx$$

$$\frac{l-x}{k}\cos kx-\frac{\sin kx}{k^2}+C_2$$

$$\therefore\quad a_m=\frac{2h}{la}\left(\frac{\sin kx}{k^2}-\frac{x\cos kx}{k}\right)_0^a$$

$$-\frac{2h}{l(l-a)}\left(\frac{l-x}{k}\cos kx+\frac{\sin kx}{k^2}\right)_a^l$$

$$=\frac{2h\sin ka}{lk^2}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{l-a}\right)=\frac{2h\sin ka}{a(l-a)k^2}$$

$$\frac{2hl^2}{m^2\pi^2a(l-a)}\sin\frac{m\pi a}{l} \qquad (১২\text{-}১১.৪)$$

$$y_{(x,t)}=\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{2hl^2}{m^2\pi^2a(l-a)}\sin\frac{m\pi a}{l}\sin\frac{m\pi x}{l}\cos\frac{m\pi ct}{l}$$ ।

(১২-১১.৫)

$$-\frac{2hl^2}{a(l-a)\pi^2}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{1}{m^2}\sin\frac{m\pi a}{l}\sin\frac{m\pi x}{l}\cos\frac{m\pi ct}{l}.$$

$$=\frac{2hl^2}{a(l-a)\pi^2}\Big[\sin\frac{\pi a}{l}\sin\frac{\pi x}{l}\sin\frac{\pi ct}{l}$$

$$+\tfrac{1}{4}\sin\frac{2\pi a}{l}\sin\frac{2\pi x}{l}\cos\frac{2\pi ct}{l}$$

$$+\tfrac{1}{9}\sin\frac{3\pi a}{l}\sin\frac{3\pi x}{l}\cos\frac{3\pi ct}{l}+\cdots\Big] \qquad (১২\text{-}১১.৬)$$

আলোচনা : ১২-১১.৬ থেকে টংকারিত তারে উৎপন্ন স্বর সম্বন্ধে নীচের সিদ্ধান্তগুলি করা যায়—

(ক) উৎপন্ন শব্দে সব সমমেলগুলিই ($m=1$ থেকে $m=\infty$) উপস্থিত ;

(খ) যেকোন সমমেলের স্পন্দনবিস্তার অখণ্ড সাংখ্যমানের (m) বিষম বা ব্যস্ত-বর্গানুপাতিক ;

(গ) উচ্চতর সমমেলগুলি এই কারণেই দ্রুতহারে ক্ষীণ হয়ে যায় ;

(ঘ) শব্দপ্রাবল্য যত কমতে থাকে সুরের সংখ্যা ততই কমতে থাকে, ফলে স্বরের বিশুদ্ধতাও (purity) ততই বাড়ে ;

(ঙ) টংকারবিন্দু (C) সরিয়ে সরিয়ে (a/l অনুপাত বদ্‌লাতে থাকলে) সুরজাতি পরিবর্তিত করা যায়—কারণ ইয়ং-হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ সূত্র এখানে প্রযোজ্য—q অখণ্ড সংখ্যা ধ'রে নিয়ে $a=l/q$ মানের সমান করলে

$$\sin (m\pi a/l)=\sin m\pi/q=\sin pq\pi/q=0$$

হবে, যদি $m=pq$ এবং p রাশিটি q-এর মতোই অখণ্ড সাংখ্যমান হয় ; সুতরাং $a=l/q$ চিহ্নিত বিন্দুগুলি নিস্পন্দবিন্দু হবে এবং $m=pq$ মানের সমমেলগুলি উৎপন্ন হবে না। এটা পরিষ্কার যে, টংকারবিন্দুতে যে সমমেলগুলির নিস্পন্দবিন্দু থাকার কথা, তারা উৎপন্ন স্বরে অনুপস্থিত থাকবে।

সিদ্ধান্তগুলি আদর্শ তারে খাটে ; বাস্তব তারে উপাদানের অল্পবিস্তর কাঠিন্য থাকায় এবং স্পন্দনে বায়ু কিছুটা বাধা দেয় ব'লে সিদ্ধান্তগুলি পুরোপুরি খাটে না। তাই উচ্চতর কম্পাংকের সুরগুলি একেবারে সঠিক সমমেল থাকে না। আবার, তারের বাঁধনবিন্দুগুলি বা তার তলায় সেতুগুলি সম্পূর্ণ দৃঢ় হতে পারে না ব'লে, উৎপন্ন কম্পাংক আদর্শ মান থেকে সামান্য কমে যায়। তা ছাড়া, টংকারণ-পদ্ধতিও সুরজাতিকে প্রভাবিত করে। যেমন নরম আঙুল দিয়ে তারকে বিচলিত করলে তারের এক বক্র ক্ষুদ্রাংশ, D বিন্দুর স্থান নেয়—এতে উৎপন্ন শব্দে সমমেলের সংখ্যা কমে যায় এবং সুরকৌলীন্যের (brilliance, richness) হানি ঘটে। পক্ষান্তরে, কঠিন ধাতুর মেরজাপে বিচলিত তারের ক্ষুদ্রাংশ, তীক্ষ্ণাগ্রত্রিভুজাকৃতি থাকায় সমমেলের সংখ্যা এবং ফলে সুরকৌলীন্য বাড়ে।

উদাহরণ : কোন তারের মধ্যবিন্দুতে টংকার দিলে উৎপন্ন সমমেল-শ্রেণী কিরকম হয় ?

সমাধান : সর্তানুসারে $q=2$; তাই ইয়ং-সূত্রবশে যুগ্মসমমেলগুলি অনুপস্থিত। ১২-১১.৬-এ $a=\frac{1}{2}l$ বসালে, আসে

$$y_{(x,t)}=\frac{2hl^2}{\frac{1}{2}l\,(l-\frac{1}{2}l)\,\pi^2}\left(\sin\frac{\pi}{2}\,\sin\frac{\pi x}{l}\cos\frac{\pi ct}{l}+\frac{1}{9}\sin\frac{3\pi}{2}\sin\frac{3\pi x}{l}\sin\frac{3\pi ct}{l}+\cdots\right)$$

$$=\frac{8h}{\pi^2}\left(\sin\frac{\pi x}{l}\cos\frac{\pi ct}{l}-\frac{1}{9}\sin\frac{3\pi x}{l}\cos\frac{3\pi ct}{l}+\cdots\right)$$

প্রশ্ন : তারের প্রান্ত থেকে দৈর্ঘ্যের এক-তৃতীয়াংশ দূরের বিন্দুকে টংকার দিলে সমমেলশ্রেণী কি হবে ?

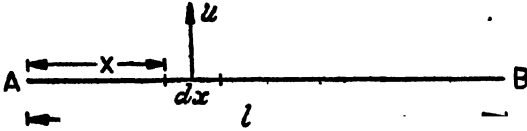
উ : $$\frac{h\sqrt{3}^5}{2\pi^2}\left(\sin\frac{\pi x}{l}\cos\frac{\pi ct}{l}+\frac{1}{4}\sin\frac{2\pi x}{l}\cos\frac{2\pi ct}{l}-\frac{1}{16}\sin\frac{4\pi x}{l}\cdot\cos\frac{4\pi ct}{l}-\frac{1}{25}\sin\frac{5\pi x}{l}\cdot\cos\frac{5\pi ct}{l}+\cdots\right)$$

১২-১২. আহত (Struck) তার :

দুই প্রান্তে বাঁধা স-টান তার স্পন্দিত ক'রে তা থেকে সুর-জাগানোর দ্বিতীয় পন্থা—শক্ত বা নরম এবং ছোট হাতুড়ি দিয়ে তারের কোন ক্ষুদ্রাংশকে আঘাত করা। তখন বিচলিত অংশ থেকে যমজ তরঙ্গ দু'দিকে তার ধ'রে চলতে সুরু করে এবং দুই প্রান্তে প্রতিফলিত হয়ে উপরিপাতনে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি ঘটায় —ঠিক যেমনটি হয় টংকারিত তারে। দু'রকম তারে কিন্তু, কম্পনের প্রাথমিক প্রান্তিক সর্ত একেবারে আলাদা। টংকারিত তারে বিচলিত বিন্দুসহ গোটা তারটাই আদি মুহূর্তে স্থির, কিন্তু দ্বিতীয় ক্ষেত্রে আঘাতপ্রাপ্ত অংশটুকু সচল, বাকি সবটাই অচল। প্রথম ক্ষেত্রে আদর্শ বিশ্লেষণে, বিচলিত অংশটি বিন্দু ধরা হয়, দ্বিতীয় ক্ষেত্রে সেটি ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্যাংশ।

বিশ্লেষণে সরলীকরণের খাতিরে আমরা ধরে নেব যে, (ক) তারটি আদর্শ অর্থাৎ সম্পূর্ণ নমনীয়, (খ) আহত তারের কম্পন স্ববশ, (গ) তার এবং হাতুড়ির মধ্যে পরশকাল এতই অল্পস্থায়ী যে, আঘাতপ্রাপ্ত অংশটুকু থেকে আলোড়ন ছড়িয়ে পড়ার আগেই আঘাত থেমে গেছে—অর্থাৎ তারের গতি এখানে ক্ষেপকজাতীয় (ballistic) হবে। বিশ্লেষণ বিধিসম্মত (rigorous) হতে হলে, তার এবং হাতুড়ির ভরের অনুপাত, আঘাতের বেগ এবং পরশকাল,

আহত অংশের দৈর্ঘ্য, হাতুড়ি শক্ত কি নরম প্রভৃতি নানা বিষয়ের আলোচনা প্রাসঙ্গিক। আমরা এত বিশদ ব্যাখ্যায় যাব না।

বিশ্লেষণ ঃ ধরা যাক, 12.8 চিত্রে সটান তারের A প্রান্ত থেকে X ব্যবধানে dx ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্যাংশে এক নিমেষ-সংঘাতে u আদিবেগ সঞ্চারিত করা হ'ল। ঐ অংশটি ছাড়া সেই নিমেষে তারের গোটা অংশটাই অচল।

চিত্র 12.8—আহত তারে স্পন্দনসৃষ্টি

তাহলে টংকারিত তারের মতো এখানেও প্রাথমিক সর্ত দুটি—

(ক) আদি মুহূর্তে সরণ সর্বত্রই শূন্য ; অর্থাৎ

$$y_0 = \begin{vmatrix} 0 & 0 < x < \mathrm{X} \\ 0 & \mathrm{X} < x < (\mathrm{X}+dx) \\ 0 & (\mathrm{X}+dx) < x < l \end{vmatrix} \qquad (\text{১২-১২.১ক})$$

(খ) আদি মুহূর্তে X থেকে X + dx অংশটুকুতে বেগ u, অন্য সর্বত্রই শূন্য ; অর্থাৎ

$$\dot{y}_0 = \begin{vmatrix} 0 & 0 < x < \mathrm{X} \\ u & \mathrm{X} < x < (\mathrm{X}+dx) \\ 0 & (\mathrm{X}+dx) < x < l \end{vmatrix} \qquad (\text{১২.১২.১খ})$$

সটান তারের যেকোন অবস্থানের (x) বিন্দুতে যেকোন নিমেষে (t) সরণ বার্নুলি সূত্র (১২-৪.৪) থেকে ধরা যায়

$$y_{(x,\,t)} = \sum^{m=\infty} (a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t) \sin (m\pi x/l)$$

এবং আদি মুহূর্তে $y_{(x,\,0)} = \sum\limits_{m=1}^{m=\infty} a_m \sin (m\pi x/l)$

এখন যেহেতু x-এর সব মানেই $\sin(m\pi x/l)$ শূন্য হতে পারে না, তাই $a_m=0$ হতে হবে।

$$\therefore \quad y_{(x,\,t)}=\sum_{m=1}^{m=\infty} b_m \sin \omega_m t \sin(m\pi x/l) \qquad (১২\text{-}১২.২ক)$$

$$\text{এবং} \quad \dot{y}_{(x,\,0)}=\sum_{m=1}^{m=\infty} (\omega_m b_m \sin(m\pi x/l)=\dot{y}_0 \qquad (১২\text{-}১২.২খ)$$

এবারে l_m-এর মান নির্ণয় করতে দ্বিতীয় সমীকরণের দু'দিকে $\sin(n\pi x/l)$ দিয়ে গুণ ক'রে গোটা তারের দৈর্ঘ্যের জন্যে সমাকলন করতে হবে।

$$\therefore \quad \int_0^l \dot{y}_0 \sin\frac{n\pi x}{l}\,dx$$

$$=\int_0^l \sum_{m=1}^{m=\infty} \omega_m b_m \sin\frac{m\pi x}{l}\sin\frac{n\pi x}{l}\,dx \qquad (১২\text{-}১২.৩)$$

আগের মতোই সমকোণীয় ধর্মবশে $m=n$ হলেই সমাকলন হবে ; $m \neq n$ হলে সমাকলন-ফল শূন্য হবে।

$$\therefore \quad \int_0^l \dot{y}_0 \sin\frac{n\pi x}{l}\,dx=\omega_m b_m\int_0^l \sin^2\frac{m\pi x}{l}\,dx$$

$$=\omega_m b_m(\tfrac{1}{2}l) \qquad (১২\text{-}১২.৪)$$

আবার X থেকে $X+dx$ দৈর্ঘ্যাংশ জুড়ে $\dot{y}_0=u$, অন্যত্র শূন্য। তাহলে

$$\tfrac{1}{2}\,\omega_m b_m l=\int_X^{X+dx} u.\sin\frac{m\pi x}{l}\,dx$$

$$=\sin\frac{m\pi x}{l}\int_X^{X+dx} u.\,dx=U\sin\frac{m\pi x}{l}$$

$$\therefore \quad b_m=\frac{2U}{l\omega_m}\sin\frac{m\pi x}{l}=\frac{2U}{l.m\pi c/l}\sin\frac{m\pi x}{l}$$

$$=\frac{2U}{m\pi c}\sin\frac{m\pi x}{l} \qquad (১২\text{-}১২.৫)$$

$$\therefore \quad y_{(x,\,t)}=\sum_{m=1} b_m \sin\omega_m t \sin\frac{m\pi x}{l}$$

$$=\sum_{m=1}^{m=\infty} b_m \sin\frac{m\pi ct}{l}\sin\frac{m\pi x}{l}$$

$$=\frac{2U}{\pi c}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{1}{m}\sin\frac{m\pi x}{l}\sin\frac{m\pi ct}{l}\sin\frac{m\pi x}{l}$$

$$=\frac{2U}{\pi c}\Bigg(\sin\frac{\pi x}{l}\sin\frac{\pi ct}{l}\sin\frac{\pi x}{l}$$

$$+\tfrac{1}{2}\sin\frac{2\pi x}{l}\sin\frac{2\pi ct}{l}\sin\frac{2\pi x}{l}+\cdots$$

$$\cdots+\frac{1}{m}\sin\frac{m\pi x}{l}\sin\frac{m\pi ct}{l}\sin\frac{m\pi x}{l}+\cdots\Bigg)$$

$m\mathrm{X}=l\sin\ (m\pi \mathrm{X}/l)=0$, অর্থাৎ m-তম, $2m$-তম, $3m$-তম সমমেলগুলি অনুপস্থিত, কারণ এদের প্রত্যেকেরই $x=\mathrm{X}$ বিন্দুতে নিস্পন্দবিন্দু হয়, অর্থাৎ ইয়ং-এর সূত্র আহত তারেও প্রযোজ্য।

আলোচনা ঃ শেষ সমীকরণটি থেকে আমরা পাচ্ছি যে, টংকারিত তারের মতো আহত তার থেকেও পূর্ণ সমমেল শ্রেণীর সুরেলা শব্দের উৎপত্তি হয়। আবার তাদের মধ্যে তফাৎও রয়েছে। এখানে কম্পনবিস্তার সুরসংখ্যার (m) বিষমানুপাতে বদলায়, তার বিষমবর্গানুপাতে নয়। ফলে এক্ষেত্রে তীক্ষ্ণতর সুরের ক্ষয়হার তুলনায় মন্থরতর। কাজেই প্রাবল্যক্ষয়ের সঙ্গে স্বরের শুদ্ধতা (purity)*-বৃদ্ধিও ধীরে ধীরে হয় অর্থাৎ স্বর অপেক্ষাকৃত দীর্ঘকাল ধরে জমজমাট থাকে। উৎপন্ন স্বরবৈশিষ্ট্য বদ্‌লাতে ঘাতবেগ (u), ঘাতদৈর্ঘ্যাংশ (dx) এবং ঘাতবিন্দু (X)—তিনটির যেকোনটিই বদ্‌লানো যায়, কিন্তু টংকারিত তারে টংকারবিন্দুর স্থানাংক (x) এবং সরণ (h) দুটি মাত্র প্রাচল পরিবর্তনেয়। আহত তারের এই বিশ্লেষণ করেছিলেন হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ—কিন্তু পরীক্ষণলব্ধ সব ফলের সঙ্গে এটা মেলে না। বস্তুত, আহত তারের স্পন্দন বিশেষরকম জটিল।

ক্যুফম্যান পরীক্ষা ক'রে দেখিয়েছেন যে, আহত তারের গতি ঠিক ক্ষেপকপ্রকৃতির হয় না, কেননা তারের স্পন্দনকালের তুলনায় তার এবং হাতুড়ির মধ্যে পরশকাল মোটেই নগণ্য নয় এবং তাদের ছাড়াছাড়ি হবার আগে দ্বিতীয়বারও স্পর্শ ঘটতে পারে। স্পর্শবিন্দু তারের একধারে রেখে, তিনি যে বিশ্লেষণ

* আমরা ১৭ অধ্যায়ে দেখব, যে স্বরে (note) সুরের (tone) সংখ্যা যত বেশী, সে ততই প্রকৃতিতে জটিল, জাতিতে সমৃদ্ধতর, অর্থাৎ তার স্বরকৌলীন্য বেশী। একটি মাত্র সুর থাকলে, সে বিশুদ্ধ, কিন্তু কানে শুনতে খুব ভালো লাগে না।

করেছেন তা অনেক বেশী পরীক্ষণানুগ। এ বিষয়ে বিস্তর পরীক্ষা-নিরীক্ষা ক'রে জর্জ নিম্নলিখিত সিদ্ধান্তগুলিতে পৌঁছেছেন—

(ক) তারের তুলনায় হাতুড়ির ভর বেশী হ'লে মূল সুরের বিস্তার বাড়ে। ঘাতবিন্দু যতই সীমাঘেঁষা হয়, মূল কম্পনের বিস্তার ততই বাড়ে।

(খ) ঘাতবিন্দু যতই তারের মাঝের দিকে সরে, মূল কম্পনের বিস্তার ততই কমতে থাকে; এই পরিবর্তনে কিছুসংখ্যক অসন্ততি থাকে—তাদের বিস্তারমাত্রা চরম ও অবম হতেও দেখা যায়। হাতুড়ির ভর কমলে অসন্ততির সংখ্যাও কমে।

(গ) শক্ত ও নরম হাতুড়ির ক্রিয়ায় যা তফাৎ দেখা যায়, তার কারণ কঠিনতা নয়, স্পর্শকালে আহত অংশের দৈর্ঘ্য কমবেশী হয় ব'লে।

১২-১৩. ছড়-টানা (Bowed) তার:

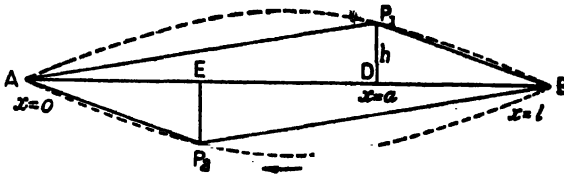
এসরাজ বা বেহালা-জাতীয় ততযন্ত্রে স-টান তারের ওপর দিয়ে সমকোণে রজন-লাগানো ছড় আগুপিছু টেনে, তারে স্পন্দন উৎপাদন এবং পোষণ করা হয়। ছড়ের প্রস্থ, স্পর্শবিন্দু, টানার বেগ, চাপ প্রভৃতি নানা সর্তের ওপর উৎপন্ন স্বরজাতি নির্ভর করে। সুরবৈশিষ্ট্য-নিয়ন্ত্রণে ছড়ের বেগের তুলনায় চাপের ভূমিকা বেশী গুরুত্বপূর্ণ; চাপ বাড়ালে উচ্চতর উপসুরগুলি জোরালো হয়। ছড়ের প্রয়োগবিন্দু সেতুর কাছাকাছি হলে, উচ্চতর সমমেলগুলি প্রকট হয়।

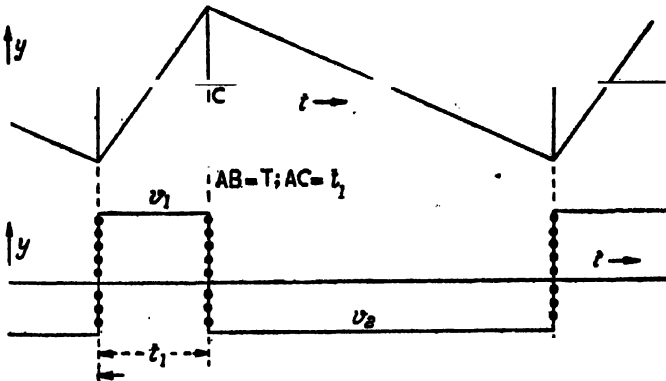
আবার উৎপন্ন স্বরের প্রাবল্য-নিয়ন্ত্রণে ছড়ের চাপের ভূমিকা গৌণ, বেগের ভূমিকা মুখ্য। বেশী বেগে শব্দ জোরালো হয়। এই প্রাবল্য আবার, ছড়ের তন্তুসংখ্যার সঙ্গে বাড়ে।

ছড়ের ক্রিয়াপদ্ধতি: ছড়ের তন্তুগুলিতে লাগানো রজনের দানাগুলি তারকে কামড়ে ধরে। তাই ছড় এগোনোর সময়ে স্থিতিঘর্ষণ, সংলগ্ন দৈর্ঘ্যাংশকে টেনে নিয়ে যেতে থাকে। ফলে, ক্রমেই ছড়ের দু'ধারে তারের দুই অংশের মধ্যে কোণ সূক্ষ্মতর হতে থাকে আর টানের প্রত্যানয়ক উপাংশ প্রবল হতে থাকে। যখন এই বল ঘর্ষণবলকে ছাড়িয়ে যায়, তখন তারটি পিছ্‌লে নেমে আসে। গতিজাড্যের দরুন সাম্যাবস্থায় পৌঁছে এই দৈর্ঘ্যাংশ থামতে পারে না, উল্টো দিকে এগোতে থাকে। কাজেই বিষমমুখী প্রত্যানয়ক বল ক্রমেই তাকে মন্থরতর করতে করতে এক সময়ে থামিয়ে দেয়। তখনই তৎসংলগ্ন সচল ছড়ের ভিন্ন অংশে তারের সেই দৈর্ঘ্যাংশটি আটকে যায় এবং আবার

ছড়ের গতিমুখে এগোতে এগোতে আবার পিছলে পেছিয়ে আসে, আবার আট্‌কে গিয়ে এগোতে থাকে। যতক্ষণ তার ঘেঁষে ছড়টি এগোতে থাকে ততক্ষণই তারের এইরকম দুই-ধাপ (two-stage) গতি অতি দ্রুত আবৃত্ত হতে থাকে।

অগ্রগতির সময়ে স্থিতিঘর্ষণ সক্রিয়, পশ্চাদ্‌গমনকালে গতীয় ঘর্ষণ। প্রথমটি, দ্বিতীয়ের তুলনায় বেশী হওয়ায় তারের ওপরে কৃত কাজ, তারের দ্বারা কৃত কাজের চেয়ে বেশী। এই দুই কাজের অন্তরই তারে স্পন্দনের শক্তি যোগায়। ছড়-টানা তারের স্পন্দন **লালিত** (maintained) বা **পোষিত** স্পন্দনের বিশিষ্ট উদাহরণ। সমজাতীয় স্পন্দন তড়িৎ-চালিত সুরশলাকার (§ ১৫-৩) ক্ষেত্রেও হয়।

স্পন্দন-বৈশিষ্ট্য ঃ হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-ই প্রথম এইজাতীয় স্পন্দনের বিস্তারিত পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালিয়ে তাত্ত্বিক ব্যাখ্যার সূত্রপাত করেন। 12.9(a)

চিত্র 12.9 (a)—ছড়-টানা তারে স্পন্দনরীতি

চিত্রে AP_1B তারের সাম্যাবস্থা ; স্পন্দনকালে AP_1B আকারটি, টংকারিত তারের মতই। কোন এক বিচলিত বিন্দুর চরম অবস্থান P_1, ধরা যাক ;

চিত্র 12.9 (b)—ছড়-টানা তারের কাল-সরণ ও কাল-বেগ রেখা

সেখান থেকে AB-র ওপর লম্ব টানলে, পাদবিন্দু হয় D। তারের চরম বিচলনবিন্দু দুই পরবলয়কার চাপ AP_1B এবং BP_2A পথে চলতে থাকবে এবং সব সময়েই AP_1, P_1B এবং BP_2, P_2A সরলরেখা বরাবর তারটি টান্‌-টান্‌ হয়ে থাকবে ; পাদবিন্দু D, AB বরাবর সমবেগে চলাচল করতে থাকবে। তারের সব-ক'টি কণাই একযোগে AB রেখাটিকে, ওপর বা নীচের দিকে অতিক্রম করে।

12.9 (b) চিত্রের ওপর অংশটি তারের কোন একটি কণার কাল-সরণ রেখা নির্দেশ করছে। ছড়ের টানে তার যখন $+y$ দিকে এগোচ্ছে তখন এই রেখার দীর্ঘতর অংশ সরণের রেখাচিত্র এবং তারটি যখন পিছলে নেমে আসে তখনকার সরণ-রেখাচিত্র ঐ রেখার হ্রস্বতর অংশটি। স্পষ্টতই স্পন্দন এখানে **শ্লথন-জাতীয়** (২-৯ অনুচ্ছেদ)। কাল-সরণ রেখা—আদর্শ ক্ষেত্রে দেশ-সরণ রেখা বা তরঙ্গ-রূপেরও পরিচায়ক ; এখানে তরঙ্গরূপ করাত-দন্তুর শ্রেণীর। আমরা ১০-১২(৩) অনুচ্ছেদে দেখেছি যে, তাতে যুগ্ম এবং অযুগ্ম উপসুর অনেকগুলিই থাকে। এখানে স্পন্দনরেখার আকার মোটামুটিভাবে ছড়ের টান-নিরপেক্ষ এবং উৎপন্ন স্বরকম্পাংক তারের স্বভাবী কম্পাংকের কাছাকাছি ; অর্থাৎ এখানে কম্পন পরবশে উৎপন্ন হলেও তাকে স্ববশ ধরা চলে—কম্পনের এই প্রকৃতি **পোষিত** বা **লালিত স্পন্দনের** অন্যতম বৈশিষ্ট্য। ছড় তারের কম্পাংক নিয়ন্ত্রিত করে না—কম্পন তারের স্বকীয় কম্পাংকেই হয়।

হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-এর বিশ্লেষণ : বিস্তারিত পরীক্ষা-নিরীক্ষা থেকে তিনি দুটি সিদ্ধান্তে পৌঁছান—

(ক) তারের সমগ্র স্পন্দন একটিমাত্র তলেই ঘটে, আর

(খ) তারের যেকোন বিন্দুই দুটি ভিন্ন কিন্তু সুষম বেগে (v_1 এবং v_2) স্পন্দিত হয়।

ছড়ের প্রয়োগবিন্দুতে তারটি যদি $1 : p$ অনুপাতে ভাগ হয়ে থাকে, তাহলে ছড়স্পৃষ্ট অংশটি যে দুই বেগে স্পন্দিত হবে, তাদের অনুপাত $v_1 : v_2 = 1 : (p-1)$ মানের হয়। তাদের মধ্যে মন্থরতর বেগটি (v_1) মানে এবং অভিমুখে ছড়ের বেগের সমান। সুতরাং t_1 অবসর জুড়ে তারের বিচলিত অংশ v_1 সুষম বেগে এবং পর্যায়কালের বাকিটা $(T-t_1)$ সময় ধরে $-v_2$ বেগে চলে ; 11.9 (b)-তে নীচের রেখাচিত্রে সরণ, সময় ও বেগের মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। এই সম্পর্কের ওপর ভিত্তি ক'রেই ফুরিয়ার-বিশ্লেষণ থেকে বেগের উপাংশগুলি মেলে।

স-টান তারের স্পন্দনের পরিচিত সরণ সমীকরণ (১২-৪.৪) থেকেই সুরু করা যাক—

$$y_{(x,\,t)} = \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t) \sin \frac{m\pi x}{l} \qquad \text{(A)}$$

$$= \sum_{m=1}^{m=\infty} (a_m \cos m\omega t + b_m \sin m\omega t) \sin \frac{m\pi x}{l}$$

$$\therefore \quad \dot{y}_{(x,t)} = \sum_{m=1}^{m=\infty} m\omega \,(-a_m \sin m\omega t + b_m \cos m\omega t) \sin \frac{m\pi x}{l}$$

এখন a_m-এর মান বার করতে আগের মতোই দ্বিতীয় সমীকরণের দু'দিকই $\sin p\omega t.dt$ দিয়ে গুণ ক'রে $t=T$ পর্যন্ত সমাকলন ক'রবো এবং সেইমতোই $p=m$ রাশিটি ছাড়া a_m-এর অন্যসব গুণিতকগুলিই শূন্য হয়ে যাবে। তাহলে

$$\int_0^T \dot{y} \sin p\omega t \,.\, dt = -a_m \,.\, m\omega \,.\, \sin \frac{m\omega x}{l} \int_0^T \sin^2 m\omega t.dt$$

$$= -a_m\, m\omega .\ \sin \frac{m\omega x}{l} . \frac{T}{2} = -a_m \sin \frac{m\omega x}{l} . \,m\pi \qquad (১২\text{-}১৩.১)$$

আমাদের অঙ্গীকারমতে, $t=0$ থেকে $t=t_1$ পর্যন্ত $\dot{y}=v_1$ এবং $t=t_1$ থেকে $t=T$ পর্যন্ত $\dot{y}=-v_2$;

$$\therefore \quad a_m \sin \frac{m\omega x}{l} = \frac{1}{m\pi} \int_0^T \dot{y} \sin m\omega t.\, dt$$

$$= \frac{1}{m\pi}\left[\int_0^{t} v_1 \sin m\omega t.\, dt - \int_{t_1}^{T} v_2 \sin m\omega t.\, dt\right]$$

$$= \frac{1}{m\pi}\left[\frac{-v_1}{m\omega}(\cos m\omega t_1 - 1) + \frac{v_2}{m\omega}(1-\cos m\omega t_1)\right]$$

$$= \frac{v_1+v_2}{m^2\omega\pi}(1-\cos m\omega t_1) = \frac{v_1+v_2}{m^2\omega\pi}.\ 2\sin^2 \tfrac{1}{2} m\omega t_1$$

$$= \frac{v_1+v_2}{m^2\omega\pi^2}.\ 2\pi \sin^2 \tfrac{1}{2} m\omega t_1$$

$$= \frac{(v_1+v_2)T}{m^2\pi^2} . \sin^2 \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \qquad (১২\text{-}১৩.২ক)$$

অনুরূপেই, $b_m \sin \frac{m\pi x}{l}$

$$= \frac{(v_1+v_2)T}{m^2\pi^2} \sin \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \cos \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \quad (\text{১২-১৩.২খ})$$

এখন $y_{(x,\,t)} = \sum_{m=1}^{m=\infty} (a_m \sin \frac{m\pi x}{l} \cos m\omega t$

$$+ b_m \sin \frac{m\pi x}{l} \sin m\omega t)$$

$$= \frac{(v_1+v_2)T}{m^2\pi^2} \sum_{m=1}^{m=\infty} (-\sin^2 \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \cos m\omega t$$

$$+ \sin \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \cos \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \sin m\omega t)$$

$$= \frac{(v_1+v_2)T}{\pi^2} \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{1}{m^2} \sin \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \sin m\omega\,(t - \tfrac{1}{2}t_1)$$

(১২-১৩.৩)

এবারে (A)-তে $(m\pi x/l) = p\pi$ $(p = 1, 2, 3, \cdots)$ বসালে দেখা যাবে যে t-র যে মানই হোক না কেন, $y=0$; সেই সর্ত ১২-১৩.৩-এতেও প্রযোজ্য হবে ; তাহলে $\frac{1}{2}m\omega t_1 = m\pi x/l$ বসবে, অর্থাৎ

$$x/l = \tfrac{1}{2}(\omega/\pi)t_1 = t_1/T$$

এই সর্তাধীনে তারের মধ্যবিন্দুতে $t_1/T = \frac{1}{2}l/l = \frac{1}{2}$ হয় ; অর্থাৎ সেখানে সম্মুখবেগ (v_1) = পশ্চাৎবেগ (v_2) এবং তাদের দুয়েরই স্থায়িত্বকাল $\frac{1}{2}T$ হবে। সেখানে বেগবিস্তার A ধরলে,

$$(v_1+v_2) = 2v_1 = 2.\frac{2A}{T/2} = \frac{8A}{T}$$

$$\therefore \quad \frac{(v_1+v_2)T}{\pi^2} = \frac{8A}{\pi^2} \quad (\text{১২-১৩.৪})$$

$$\therefore \quad y_{(x,\,t)} = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{1}{m^2} \sin \tfrac{1}{2} m\omega t_1 \sin m\omega\,(t - \tfrac{1}{2}t_1)$$

$$= \frac{8A}{\pi^2} \sum_{m=1}^{m=\infty} \frac{1}{m_2} \sin \frac{m\omega x}{l} \sin m\omega\,(t - \tfrac{1}{2}t_1)$$

(১২-১৩.৫ক)

$\frac{1}{2}t_1$ নিমেষে গণনা সুরু করলে নিমেষ-সরণ হবে

$$y_{(x,\,t)}=\frac{8A}{\pi^2}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{1}{m^2}\sin\frac{m\omega x}{l}\sin m\omega t \qquad (১২\text{-}১৩.৫খ)$$

এই দুই সমাধানে, ছড়ের প্রয়োগবিন্দুতে যে যে কম্পনের নিস্পন্দবিন্দু হওয়ার কথা, ইয়ং-এর সূত্রানুসারে তাদের বাদ দিতে হবে। এখানে A, মূলসুরের চরম স্পন্দনবিস্তার এবং দেখা যাচ্ছে, সেটি বেগের ওপরেই নির্ভর করে।

টংকারিত ও ছড়-টানা তারের স্পন্দনের তুলনা : 12.7 এবং 12.9(a) চিত্র থেকে বোঝা যায় যে, কোন নিমেষে দুই ক্ষেত্রেই সরণরেখা একই—স্থূলকোণে আনত দুই পরস্পরচ্ছেদী সরলরেখা। আদি নিমেষে টংকারিত তারে সরণের সমীকরণ ১২-১১.৫ থেকে আসে

$$y_{P(x,\,0)}=\frac{2hl^2}{a(l-a)\pi^2}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{1}{m^2}\cdot\sin\frac{m\pi x}{l}\cdot\sin\frac{m\pi a}{l} \qquad (১২\text{-}১৩.৬)$$

আর, আদি নিমেষে ছড়-টানা তারে

$$y_{B(x,\,0)}=\frac{8A}{\pi^2}\sum_{m=1}^{m=\infty}\frac{1}{m^2}\sin\frac{m\omega x}{l}\left(-\sin\tfrac{1}{2}t_1\right)$$

এই দুই সমীকরণ তুলনা ক'রে দেখা যাচ্ছে যে, দুই সরলরেখার ছেদবিন্দুর স্থানাংকের (P) অর্থাৎ চরম বিস্তারের মধ্যে সম্পর্ক হচ্ছে

$$hl^2/(l-a)a=\pm 4A \qquad (১২\text{-}১৩.৭)$$

আবার h এবং a-এর মান সময়ের সঙ্গে বদলায়; তাই ১২-১৩.৫(খ) এবং ১২-১৩.৬ তুলনা ক'রে পাচ্ছি

$$\sin(m\pi a/l)=\pm\ \sin m\omega t \qquad (১২\text{-}১৩.৮)$$

এই সম্পর্ক থেকে a-র মান মিলবে। জ্যামিতিক দৃষ্টিকোণ থেকে এই দুই সম্পর্ক দুটি তথ্য দিচ্ছে—(১) দুই সরলরেখার ছেদবিন্দু (P)-র অভিক্ষেপ D বিন্দু, $x=0$ থেকে $x=l$ পর্যন্ত যাতায়াত করে; (২) আর P সর্বদাই তারের সাম্য-অবস্থানকে সাধারণ জ্যা ধ'রে আঁকা দুই পরবলয়ের, একটির ওপরে থাকে।

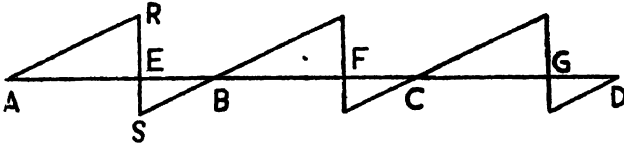
দু'রকম তারেই স্পন্দনবিস্তার m-এর বর্গের বিষমানুপাতে বদলায়।

তফাৎ এই যে, টংকারিত তারে স্পন্দন কালক্রমে মন্দিত হতে থাকে, আর ছড়-টানা তারে কম্পন লালিত বা পোষিত হতে থাকে, কিন্তু তার কম্পাংক স্ববশ, বিস্তার অক্ষুন্ন।

রমনের বিশ্লেষণ: নোবেল পুরস্কার-বিজয়ী ভারতীয় বিজ্ঞানী রমন ফুরিয়ার-ক্রম বাদ দিয়েই ছড়-টানা তারের কম্পনের বিকল্প বিশ্লেষণ দিয়েছেন। তিনিও কিন্তু ছড়ের প্রয়োগবিন্দুর দুটি ভিন্ন ও বিপরীতমুখী বেগকেই বিশ্লেষণের ভিত্তি করেছেন।

তাঁর মতে তারের বিক্ষুব্ধ অংশ থেকে উৎপন্ন যমজ তরঙ্গ দুই প্রান্ত থেকে প্রতিফলিত হয়ে এসে উপরিপাতনের ফলে স্থাণু স্পন্দনের উৎপত্তি ঘটায়; তারের প্রতি বিন্দুতে অনুপ্রস্থ বেগের $(\dot{y})$ মান নির্ণয় করা তখন তুলনায় সোজা। দুই বিষমমুখী প্রতিফলিত তরঙ্গ যখন ছড়ের প্রয়োগবিন্দু অতিক্রম ক'রে যায় তখন সেখানে সুষম লব্ধিবেগ $\dot{y}_1$ মান থেকে হঠাৎ সুষম মান $\dot{y}_2$-এ বদলে যায়। এই পরিবর্তন-নিমেষটুকুতে ঐ বিন্দুতে $\ddot{y}$-এর মান $\pm\infty$ এবং অন্য সব সময়েই $\ddot{y}$ শূন্যমান থাকে। কাজেই $+x$-মুখী তরঙ্গের দরুন তারের বেগ যদি $\dot{y}_1$ ধরা হয় এবং বিপরীতমুখী তরঙ্গের জন্যে বেগ $\dot{y}_2$ হয়, তবে বেগ-পরিবর্তনের নিমেষটুকু ছাড়া, $(\dot{y}_1+\dot{y}_2)=$ ধ্রুবক থাকবে এবং তারের দুই প্রান্তবিন্দুতে সর্বদাই $\dot{y}_1=-\dot{y}_2$ হবে। এই দুই সর্ত পূরণ করতে হলে বেগ-তরঙ্গের দেশ-সরণরেখার নতি বরাবরই স্থির থাকবে; খালি, যেখানে যেখানে বেগ হঠাৎ বদলাবে সেখানে সেখানে নতিরেখায় অসন্ততি থাকবে। তাহলেই তরঙ্গরূপ দ্বি-স্তর বক্ররেখা (two-stage zigzag) হবে। 12.10 চিত্রে টানা এবং ভাঙা রেখা দিয়ে যথাক্রমে + এবং − মুখী দুই সচল তরঙ্গ এবং তাদের উপরিপাতন দেখানো হয়েছে; লক্ষণীয় যে, ওপর থেকে নীচ পর্যন্ত, ছড়ের প্রয়োগবিন্দুতে (x_0) উপরিপাতনের ফলে উৎপন্ন বেগ ধ্রুবমান ঋণাত্মক রাশি থাকে, কিন্তু স্পন্দনের নীচের প্রান্তে পৌঁছানোমাত্রেই লব্ধি-বেগ হঠাৎ লাফিয়ে ধনাত্মক মানে ওঠে এবং স্পন্দনের ওপরপ্রান্তে পৌঁছানো পর্যন্ত মানে অক্ষুন্ন থাকে।

চিত্র 12.10—ছড়-টানা তারের স্পন্দনে দ্বি-স্তর বক্ররেখা

এক স্পন্দনকালের মধ্যে বেগের মান $\dot{y}_1$ থেকে নির্দিষ্ট কালান্তরে $\dot{y}_2$ মানে পৌঁছায় ; এর ব্যাখ্যা করতে ধরা হয় যে, x_0 বিন্দুতে যে নিমেষে একটি তরঙ্গের দরুন কোন বেগ থাকবে না, ঠিক সেই নিমেষেই অন্য তরঙ্গসৃষ্ট অসন্ততিটি সেখানে এসে পৌঁছাবে। যদি তারের দ্বিগুণ দৈর্ঘ্যের মধ্যে p-সংখ্যক অসন্ততি থাকে তাহলে x-অক্ষের এবং তরঙ্গরূপ রেখার মধ্যে কোণ $\alpha\ [=\tan^{-1} p(\dot{y}_1-\dot{y}_2)/2l]$ হবে। সব ক'টি বেগ-তরঙ্গের উপরিপাতনে উৎপন্ন বেগ-রেখাচিত্রে x-অক্ষের সঙ্গে $\tan^{-1} 2\alpha$ নতিতে টানা

চিত্র 12.11—ছড়-টানা তারে বেগ-তরঙ্গরূপ স্পন্দনী অনুবীক্ষণ

$(p+1)$-সংখ্যক রেখায় p-সংখ্যক অসন্ততি থাকবে (চিত্র 12.11) ; এই চিত্রের A, B, C, D বিন্দুগুলি p-তম উপসুরের নিস্পন্দবিন্দু আর E, F, G বিন্দুগুলিতে বেগের মান $\dot{y}_1$ থেকে $\dot{y}_2$ মানে হঠাৎ বদলায় এবং

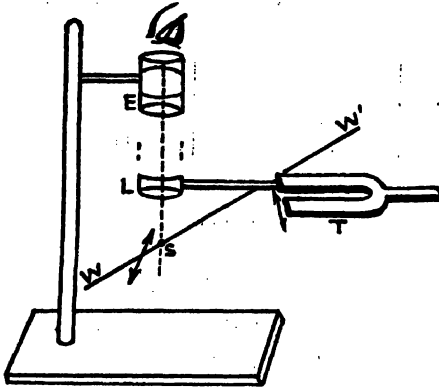
$$\frac{\dot{y}_2}{\dot{y}_1}=\frac{ES}{ER};\ \frac{\dot{y}_2}{\dot{y}_1+\dot{y}_2}=\frac{EB}{AE+EB}=\frac{EB}{AB}=\frac{x_p}{l/p}=p\frac{x_p}{l}$$

পর্যায়কালের যে ভগ্নাংশসময় ধ'রে তারখণ্ড $\dot{y}_2$ বেগে ছড়ের সঙ্গে সমমুখে চলে সেটিও এই রাশিটির সমান। কোন বিন্দুতে সরণ, বেগ-তরঙ্গের কাল-সমাকল (time-integral), সুতরাং বেগের রেখাচিত্র থেকে তারের নিমেষ-সরণ প্রতিরূপ গণনা করা যায়। একটিমাত্র অসন্ততি-বিন্দুতে পরস্পরচ্ছেদী দুটি সরলরেখা (চিত্র 12.7) থাকে। তখন দুই বিষমমুখী সরণ-তরঙ্গের উপরিপাতনে তারের নিমেষ-প্রতিকৃতি (configuration) পাওয়া যায়।

১২-১৪. স্পন্দনশীল তারের পরীক্ষা-নিরীক্ষা :

গাণিতীয় বিশ্লেষণ দাঁড় করাতে কিম্বা তাতে লব্ধ সিদ্ধান্তগুলি যাচাই ক'রে দেখতে, স্পন্দনশীল তারকে নিজের রেখাচিত্র আঁকতে দিয়ে কিম্বা এর সচল আলোকচিত্র নিয়ে বা ভ্রমিদৃক্ পদ্ধতিতে তার স্পন্দনবেগের আপাতহ্রাস ঘটিয়ে (১৬ অধ্যায়ের সুরশলাকার কম্পাংক-নির্ণয়ের পদ্ধতিগুলির অনুসরণে) অনেক পরীক্ষা-নিরীক্ষা করা হয়েছে। প্রখ্যাত বিজ্ঞানী হেলম্‌হোলৎজ এ বিষয়ে অগ্রণী এবং পথিকৃৎ। পরবর্তী কালে কুগার-মেনজেল, র‍্যাপস্,

রমন প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা টংকারিত, বিশেষ ক'রে ছড়-টানা তারের স্পন্দন নিয়ে বিস্তর কাজ করেছেন। আহত তারের স্পন্দন নিয়ে অনুরূপ কাজ করেছেন ক্রাফ্‌ম্যান এবং জর্জ। আমরা খুব সংক্ষেপে সে-সব পরীক্ষা-পদ্ধতিগুলি আলোচনা ক'রবো।

(১) **স্পন্দনী অণুবীক্ষণ** : হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-উদ্ভাবিত এই যন্ত্রে (চিত্র 12.12) অভিনেত্রকে (eyepiece, E) একটি খাড়া স্তম্ভ বরাবর ওঠা-নামা করানো যায়; অভিলক্ষ্য (objective, L) অনুভূমিক এক সুরশলাকার (T) একটি বাহুর সঙ্গে যুক্ত এবং E-র সঙ্গে সমাক্ষ-ভাবে থাকে। এদের তলায় WW' পরীক্ষাধীন তার; এর কম্পন, অনুভূমিক তলে সুরশলাকার স্পন্দনের সমকোণে হয়। তারের গায়ে একটি সাদা বিন্দু (S) অণুবীক্ষণের ফোকাস-তলে থাকে। তার এবং সুর-শলাকার স্পন্দন পরস্পরের সমকোণে হওয়ায়, উৎপন্ন লিসাজু-চিত্র অণুবীক্ষণে দেখতে পাওয়া যায়। কি-ভাবে এই চিত্রের প্রকৃতি থেকে কম্পাংক-অনুপাত পাওয়া যায় সে-কথা পরে ১৬ পরিচ্ছেদে বলা হবে। এই যন্ত্রের সাহায্যে টংকারিত এবং ছড়-টানা তারের প্রতিটি বিন্দুর কম্পনভঙ্গী একে একে নিরীক্ষণ করা যায়।

চিত্র 12.12—স্পন্দনী অণুবীক্ষণ

(২) **আলোকচিত্র গ্রহণ** : ক্রুগার-মেন্‌জেল এবং র‍্যাপ্‌স্‌ উদ্ভাবিত এই পন্থায় উজ্জ্বলভাবে আলোকিত খাড়া একটি রেখাছিদ্রের (slit) ঋজু প্রতিবিম্ব বেলনীয় (cylindrical) লেন্‌সের সাহায্যে অনুভূমিক স-টান তারের ওপর ফোকাস করা হয়। এই দুয়ের ছবি একযোগে আলোক-সচেতন প্লেট বা সচল ফিল্‌মের ওপরে পড়ে। ফিল্‌ম্‌-নেগেটিভে রেখাছিদ্রের প্রতিবিম্ব একটি খাড়া, কালো রেখা এবং তারের আলোকিত বিন্দুর প্রতিবিম্ব সাদা ফুটকির মতো দেখা যায়। ফিল্‌ম্‌ তারের সমান্তরালে সরতে থাকলে তার ওপরে স্পন্দনশীল তারের আলোকবিন্দুটি নিজের কাল-সরণ রেখা আঁকতে থাকে। এই রেখাচিত্রের সঙ্গে তাত্ত্বিক স্পন্দনরীতির তুলনা করা হয়। এই পরীক্ষণে টংকারিত এবং ছড়-টানা তারের সম্পর্কে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজের সিদ্ধান্তগুলি সমর্থিত হয়েছে; কিন্তু তার

আহত তারের সম্পর্কিত সূত্রগুলি সমর্থিত হয়নি। ক্রুফ্‌মান এবং জর্জের পরীক্ষা-পদ্ধতি এই পন্থারই উন্নততর সংস্করণ।

(৩) ভ্রমিদৃক্‌ (Stroboscopic) পদ্ধতি : মিকোলা-উদ্ভাবিত এই পদ্ধতিতে তারের মধ্যবিন্দুর ছায়া একটি ঘূর্ণমান বেলনের ওপর ফেলা হয়। বেলনটির ওপর সমপ্রস্থ ক'টি সাদা পাত সমান সমান তফাতে তারের সমকোণে লাগানো থাকে। বেলন স্থির থাকলে, নর্তনশীল বিন্দুর ছায়াটি কোন একটি সাদা পাতের ওপর নাচতে থাকে। আবার সে ঘুরতে থাকলে ভিন্ন ভিন্ন নিমেষে ছায়ার অবস্থানগুলি পরপর পাতের ওপর পড়তে থাকে ; যদি এক সেকেণ্ডে তারটি যতবার কাঁপে ঠিক ততগুলি পাত ছায়াবিন্দুটি অতিক্রম ক'রে যায় তাহলে বেলনের ওপরে তারের স্পন্দনরেখা স্থির হয়ে থাকে। প্রয়োজনে এই রেখাচিত্র ফিল্‌মে ফেলে স্থায়ী ছাপ নেওয়া সম্ভব।

১২-১৫. বৃকস্বর (Wolf note) :

বেহালা-জাতীয় ততযন্ত্রে উৎপন্ন সুর-কম্পাংক, যন্ত্রের শব্দাসনের কোন কোন সমমেলের সমান হলে, এক বিশেষ রকমের উগ্র অবাঞ্ছিত সুরের সৃষ্টি হয়। তখন নেকৃড়ে-জাতীয় জীবের দীর্ঘায়িত আর্তস্বরের মতো তীক্ষ্ণ সুর শোনা যায় ; একেই বৃকসুর বলে। সে-সময়ে ছড় আর তারকে কামড়ে ধরে না এবং নরম সুর বাজানো যায় না—তারটি যেন আর বাদকের নিয়ন্ত্রণে থাকে না। ছড়ের চাপ বাড়ালে সুর অস্থির-প্রকৃতির হয়, প্রাবল্য কেবলই বদলায়, যন্ত্রটির সমগ্রভাবে প্রবল স্পন্দন হতে থাকে।

স্পন্দন-বৈশিষ্ট্য : বিজ্ঞানী হোয়াইট বৃক-কম্পাংকে তারের এবং বেহালার শব্দাসনের আলোকচিত্র একযোগে তুলে দেখিয়েছেন যে শব্দাসনের প্রশস্তবিস্তার সরল দোলন হয় ; কম্পাংক সামান্য আলাদা হলেই স্পন্দন অত্যন্ত জটিল হয়। শব্দাসনের স্পন্দনবিস্তার কমা-বাড়ার সঙ্গে শব্দ-প্রাবল্যের ওঠা-নামা সংশ্লিষ্ট। তখন বেহালার তার আর পেটির (belly) মধ্যে যুগ্ম স্পন্দন ঘটে, যন্ত্রের নমনীয় সেতুর মাধ্যমে তারা শক্তি বিনিময় করে ; পেটিটি অনুনাদক। প্রাবল্যের ওঠা-নামা অর্থাৎ স্বরকম্পের সংখ্যা, এই দুয়ের যোজনাংকের ওপর নির্ভর করে। ছড় প্রায় সমকম্পাংকের যুগ্ম স্পন্দন লালন করে।

ব্যাখ্যা : বৃকসুর কেন যে সাধারণত শব্দপেটির উচ্চতর সমমেলেই প্রকাশ পায়, মূল সুরে নয়, তার বিশ্লেষণ রমন দিয়েছেন। তারের একধারে ছড় বসালে মূল সুর বাজাতে সমমেলের তুলনায় বেশী চাপ লাগে। তাই বৃক-

কম্পাংকে তারের মূল সুর বাজলেই অনুনাদ হয়ে শব্দপেটিতে বেশী শক্তি চ'লে যায় এবং তার ও ছড়ের মধ্যে চাপ কমে যায় ; ফলে তারের স্পন্দন বদ্‌লে গিয়ে সমমেল জোরালো হয়ে ওঠে। তখন স্বভাবতই পেটির স্পন্দন থেমে গিয়ে তারে মূল সুরের পুনরাবির্ভাব হয়। মূল সুর এবং তার অষ্টকোর্ধ্ব সমমেলের মধ্যে এই চক্র ক্রমান্বয়ে আবৃত্ত হতে থাকায় বৃকসুর শোনা যায়। স্পন্দমান তারের সচল আলোকচিত্রে এই চক্র-আবৃত্তি হতে দেখা গেছে।

টংকারিত বাদ্যযন্ত্রের তারে এবং কাষ্ঠাসনে জোরালো সরল অনুনাদ ঘটলে মাঝে মাঝে বৃকসুর উৎপন্ন হতে দেখা গেছে।

১২.১৬. আদর্শ স-টান তারের পরবশ কম্পন :

এপর্যন্ত আমরা স-টান তারের **স্ববশ আন্দোলনই** আলোচনা করেছি। টংকারিত তারে আদি সরণ আর আহত তারে আদি বেগ দিয়েই এই কম্পনের সুরু হয়। ছড়-টানা তারের কম্পন লালিত হয় ব'লে সে স্পন্দনও স্ববশ। হয়েছে। এবারে খুব লম্বা স-টান তারের এক প্রান্তে সরল দোলজাতীয় বল প্রয়োগে **পরবশ কম্পনের** কথা আমরা আলোচনা ক'রবো। ধরে নেওয়া যাক, (১) তারটি x-অক্ষ বরাবর আছে (২) y-অক্ষ বরাবর তারের $x=0$ বিন্দুটির সরল দোলন ঘটানো হচ্ছে ; (৩) তারের অপর প্রান্ত অনড় অবলম্বনে বাঁধা। এক্ষেত্রে তারের সেই প্রান্তে বাঁধনের জায়গায় প্রতিরোধ অর্থাৎ যান্ত্রিক বাধের উৎপত্তি হয়। তারপ্রান্তে প্রযুক্ত অনুপ্রস্থ পর্যাবৃত্ত বল ($F_0e^{j\omega t}$) এবং সেখানে উৎপন্ন প্রান্তিক বেগ ($\dot{y}_{x=0}$) এই দুয়ের অনুপাতকে **তরঙ্গ-বাধ** বলে।

$x=0$ বিন্দুতে পর্যাবৃত্ত বল $F_0e^{j\omega t}$ প্রয়োগে পরবশ স্পন্দন সুরু করলে, $x=x$ বিন্দুতে অনুপ্রস্থ সরণ এবং স্পন্দন-রেখার নতি দাঁড়াবে যথাক্রমে

$$y=Ae^{j(\omega t-\beta x)} \quad \text{এবং} \quad \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x=x}=-j\beta e^{-j\beta x}.Ae^{j\omega t}$$

$$\therefore \quad \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x=0}=j\beta Ae^{j\omega t}=j(\omega/c)Ae^{j\omega t} \qquad (১২\text{-}১৬.১)$$

আবার প্রান্তবিন্দুতে প্রত্যানয়ক বল (চিত্র 12.1) হবে

$$R=T\tan\theta=T\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x=0}=Tj\,\frac{\omega}{c}\,Ae^{j\omega t} \qquad (১২\text{-}১৬.২)$$

এখন, প্রযুক্ত পর্যাবৃত্ত বলই প্রত্যানয়ন ঘটায় ; অতএব

$$F_0e^{j\omega t}=T\tan\theta=Tj\,(\omega/c)\,Ae^{j\omega t}$$

$$\therefore \quad A=\frac{F_0}{j\omega}\cdot\frac{c}{T}=\frac{F_0}{j\omega}\cdot\frac{c}{\mu c^2} \qquad (১২\text{-}১৬.৩)$$

$$\therefore \quad y=\frac{F_0}{j\omega\mu c}\, e^{j(\omega t-\beta x)} \quad \text{এবং} \quad \dot{y}=\frac{F_0}{\mu c}\, e^{j(\omega t-\beta x)}$$

$$\therefore \quad (\dot{y})_{x=0}=\frac{F_0 e^{j\omega t}}{\mu c}$$

$$\text{এবং তরঙ্গবাধ}=\frac{F}{(\dot{y})_{x=0}}=\mu c=\sqrt{\mu T} \qquad (১২\text{-}১৬.৪)$$

তাহলে **তরঙ্গ-বাধ** বা নিবেশ (input)-বাধ **বিশুদ্ধ রোধজাতীয়,** অতএব **বাস্তব** রাশি ; অর্থাৎ তারে যে শক্তি নিবেশ করা হতে থাকে, তার কিছুই ফেরে না, কেননা তারটি অসীম দৈর্ঘ্য ব'লে ধরা হয়। দৈর্ঘ্য সীমিত হলেই প্রতিফলনের দরুন কিছুটা শক্তি ফেরে—তখন প্রান্ত-বাধের মান $\sqrt{\mu T}$ থেকে আলাদা এবং প্রকৃতিতে জটিল-জাতীয় হয়।

১২-১৭. স্বনকের ভূমিকায় স-টান তার :

তিনশ্রেণীর বহু সমাদৃত ততযন্ত্রগুলিতে, স-টান তার যে সুরের উৎস, সে-কথা অধ্যায়ের গোড়াতেই বলা হয়েছে। কিন্তু ওপরে আলোচিত তারের স্পন্দন-বিশ্লেষণগুলি এইসব যন্ত্র অর্থাৎ স্বনকগুলিতে অপ্রযোজ্য—কারণ যন্ত্রগুলিতে শব্দপেটি ও অন্যান্য নানা অনুষঙ্গ থাকে। তারের আয়তন অতি সামান্য, কাজেই স্পন্দনকালে সে সামান্যই বায়ু বিক্ষুব্ধ করতে পারে। সুতরাং শব্দের বিকিরক হিসাবে তার অদক্ষ, দুর্বল ; শব্দপ্রাবল্য এতে সামান্যই হয়। প্রাবল্য বাড়াতে, বাদ্যযন্ত্রে একাধিক তার কাঠের শব্দপেটির ওপরে পেরেক বা মুণ্ডি বা গোঁজের (pegs) মধ্যে স-টান ভাবে রাখা থাকে। তার কাঁপতে থাকলে এই অবলম্বনগুলির ওপর বল পর্যায়ক্রমে এবং নিয়মিতভাবে বাড়ে-কমে। কাজেই তার ও পেটি বা শব্দাসনের যুগ্মিত পরবশ কম্পন হয়। এদের মধ্যে অনুনাদ ঘটলে তারের স্পন্দনবিস্তার তথা শব্দপ্রাবল্য বাড়ে। কিন্তু অনুষঙ্গগুলির যুগ্ম এবং পরবশ কম্পনের একক এবং সামগ্রিক প্রতিক্রিয়ায়, উৎপন্ন সুরজাতি পাল্টে যেতে বাধ্য। তাই যায়ও। প্রকৃতপক্ষে ততযন্ত্রে তারের বাস্তব স্পন্দন খুবই জটিল, অনেকসময়েই গণিতীয় বিশ্লেষণের সাধ্যাতীত। এ সম্বন্ধে আবার ১৭-১৪ অনুচ্ছেদে সংক্ষিপ্ত আলোচনা করা হবে।

১২-১৮. ঝিল্লী ও ছদের স্পন্দন :

আদর্শ তার একমাত্রিক স্পন্দক ; আদর্শ ঝিল্লী দ্বি-মাত্রিক স-টান স্পন্দক। সংজ্ঞানুসারে ঝিল্লী বলতে "সর্বদিকে সমটান-প্রয়োগে বিতানিত (strained), সম্পূর্ণ নমনীয়, অত্যণুবেধ কঠিন ফলক" (আদর্শ তারের সংজ্ঞা তুলনীয়) বোঝায়। ঝিল্লীর বেধ নেই, সুতরাং কাঠিন্য নেই (স্পষ্টতই অবাস্তব), তাই এর স্পন্দন সম্পূর্ণভাবে টান বা তানিশাসিত।

ঝিল্লীর সামান্য বেধ থাকলে, তাকে **ছদ** বলে। বেধ থাকায় ছদের অল্পস্বল্প কাঠিন্য থাকবে, সুতরাং এর স্পন্দনে তান ও কাঠিন্য দুয়েরই ভূমিকা আছে। স-টান ঝিল্লী ও ছদের ক্ষেত্রে মাত্র অনুবেধ অর্থাৎ অনুপ্রস্থ স্পন্দনই সম্ভব। বাঁয়া-তবলা, ঢাক, ঢোল, দামামা, দুন্দুভি, রবাব, নানা-জাতীয় ড্রাম প্রভৃতি ঘাত-যন্ত্রে স-টান ছদ স্বনকের এবং টেলিফোন, মাইক্রোফোন, লাউড-স্পীকারে শব্দগ্রাহক এবং পুনরুৎপাদকের ভূমিকা নেয়।

আদর্শ ঝিল্লীর স্পন্দন সমীকরণ : ধরা যাক, সীমিত ক্ষেত্রফলের এক ঝিল্লীর সীমানা বরাবর লম্বমুখীটান (T) তার তল (x-y) বরাবর ক্রিয়া ক'রে তাকে স-টান রেখেছে। এখন তার dl সীমাদৈর্ঘ্যযুক্ত dS ক্ষেত্রাংশের যদি z-অক্ষ বরাবর সামান্য অনুবেধ সরণ dz হয়, তাহলে dl দৈর্ঘ্যসীমিত ক্ষেত্রের ওপর টানের মোট সক্রিয় লম্ব-উপাংশ হবে

$$T\int \frac{\partial z}{\partial n} \cdot dl$$

এখানে n, ক্ষেত্রাংশ-তলের সমকোণে সীমারেখার উপর লম্ব। গ্রীনের উপপাদ্যকে (Green's theorem) দ্বিমাত্রায় নিয়ে দেখানো যায় যে

$$T\int \frac{\partial z}{\partial n} \cdot dl = T\iint \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) dS \qquad (১২\text{-}১৮.১)$$

ঝিল্লীর উপাদানের তল-ঘনত্ব σ ধরলে, সক্রিয় জড়তা-বল হবে

$$\text{ভর} \times \text{ত্বরণ} = \sigma \iint dS \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

এই বল স্বভাবতই টানের উপাংশের সমান ও বিপরীতমুখী হবে। সুতরাং

$$\sigma \iint dS \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = T \iint \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) dS \qquad (১২\text{-}১৮.২)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{T}{\sigma}\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}\right) \qquad (১২\text{-}১৮.৩)$$

কাজেই আমরা দ্বি-মাত্রিক তরঙ্গ-সমীকরণের (§৫-৯থ) সঙ্গে তুলনা ক'রে ঝিল্লী-তলে অনুপ্রস্থ তরঙ্গের বেগ পাচ্ছি

$$c = \sqrt{T/\sigma} \qquad (১২\text{-}১৮.৪)$$

ঝিল্লীর উপাদানের আয়তন-ঘনত্ব ρ এবং বেধ d ধরলে, $\sigma = \rho d$ হয়। অনুবেধ সরণ $z = a \cos \omega t$ ধরলে, ১২-১৮.৩ থেকে স্পন্দনের সমীকরণ দাঁড়ায়

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \frac{\omega^2}{T/\sigma} z = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 z = 0 \qquad (১২\text{-}১৮.৫)$$

ঝিল্লীর কিনারায় $z = 0$ এই প্রান্তিক সর্তাধীনে, ω/c-র নির্দিষ্ট কয়েকটি মাত্র মানেই এই অবকল সমীকরণের সমাধান সম্ভব এবং কেবল সেই মানগুলিই ঝিল্লীর কম্পাংক-মান নিয়ন্ত্রণ করে।

ক. চতুষ্কোণ ঝিল্লী: ধরা যাক, তার দৈর্ঘ্য ও প্রস্থ l এবং b যথাক্রমে x এবং y-অক্ষ বরাবর রাখা গেল। পরিসীমা স্বভাবতই অনড়, অর্থাৎ সেখানে $z = 0$; অর্থাৎ প্রান্তিক সর্ত হচ্ছে যে, কোন কোনায় মূলবিন্দু ধরলে, $x = 0$ বা l এবং $y = 0$ বা b-বিন্দুতে $z = 0$ হবে। ১২-১৮.৩ সমীকরণে এই সর্ত বসাতে হলে

$$z = a \sin \frac{m_l \pi x}{l} \cdot \sin \frac{m_b \pi y}{b} \cdot \sin \omega t \qquad (১২\text{-}১৮.৬)$$

হওয়া চাই। একে অবকলন ক'রে যথাস্থানে মান বসালে, পাব

$$\omega^2 = \pi^2 c^2 \left[(m_l/l)^2 + (m_b/b)^2\right]$$

$$\therefore \quad n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{2}\left[\frac{m_l^2}{l^2} + \frac{m_b^2}{b^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\frac{T}{4\rho d}\left(\frac{m_l^2}{l^2} + \frac{m_b^2}{b^2}\right)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (১২\text{-}১৮.৭)$$

এদের মধ্যে কতকগুলি উপসুর সমমেল। $m_l = m_b = 1$ হলে, সমমেল উৎপন্ন হবে। নিম্ন কম্পাংকের সুরগুলি কাছাকাছি থাকায় শ্রোতার কানে

তারা বেসুরো শোনায়। অন্য কম্পাংকগুলি উৎপন্ন হলে নিস্পন্দরেখা মেলে; তাদের সমীকরণ পেতে হলে ১২-১৮.৬-এ $m_l x/l$ বা $m_b y/l$ পূর্ণসংখ্যা হবে, অর্থাৎ এর বিস্তার সহগগুলির কোন একটিকে শূন্য হতে হবে। চারকোনা ঝিল্লীর মূল কম্পাংক আসে

$$n_0 = \frac{1}{2}\left[\frac{T}{\sigma}\cdot\frac{(l^2+b^2)}{lb}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (১২\text{-}১৮.৮)$$

খ. গোল ঝিল্লী: এর ব্যাসার্ধ r হলে এবং পরিধি বরাবর ঝিল্লীতলে সক্রিয় লম্ববলের ক্রিয়ায় ঝিল্লীর প্রতিমিত স্পন্দন হলে, ১২-১৮.৫ সমীকরণকে

$$\frac{\partial^2 z}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial z}{\partial r}+\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 z=0 \qquad (১২\text{-}১৮.৯)$$

আকারে প্রকাশ করা যায়। তার সমাধানের রূপ $J_0(\omega r/c)=0$; J_0 এখানে শূন্যক্রমের এবং প্রথম শ্রেণীর বেসেল (Bessel) ফলন। এই ফলনগুলির বীজদের মান

$\omega r/\pi c = 0.766,\ 1.757,\ 2.755,\ 3.753,\cdots$ প্রভৃতি

প্রথমোক্ত বীজটিই মূল স্পন্দনরীতি ঘটায় এবং তার কম্পাংক হয়

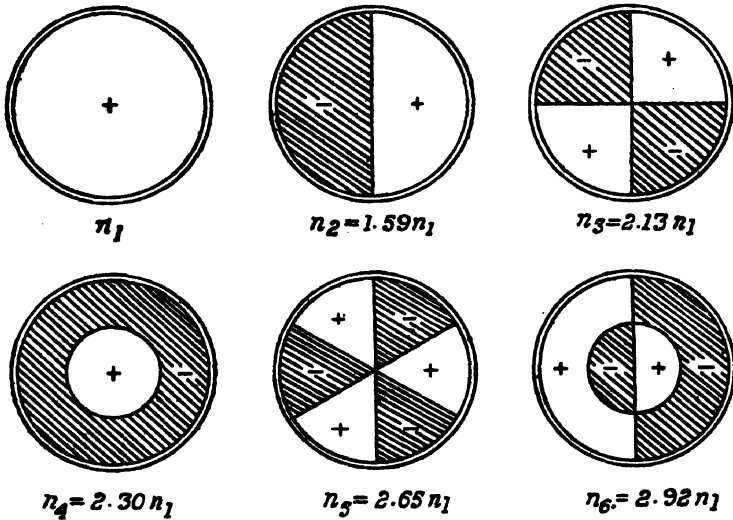
$$n_0 = \frac{0.766}{2r}\left[\frac{T}{\sigma}\right]^{\frac{1}{2}} = (0.383/r)\left[\frac{T}{4\rho d}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \frac{0.192}{r}\left[\frac{T}{\rho d}\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (১২\text{-}১৮.১০)$$

এক্ষেত্রে উৎপন্ন নিস্পন্দরেখাগুলি বৃত্তাকার; m-তম স্পন্দনরীতিতে ঝিল্লীতলে তাদের সংখ্যা $(m-1)$ হয়। মূল স্পন্দনরীতিতে নিস্পন্দ বৃত্তের ব্যাসার্ধ $a_0=0.436r$ এবং $n_1=0.383c/\pi a_0$ হবে। কাজেই উপসুরগুলি সমমেল হতে পারে না।

গ. ঝিল্লী ও ছদের স্পন্দন-নিরীক্ষণ-ব্যবস্থা এবং ব্যবহারিক প্রয়োগ: সাবানের ফেনা বা গ্লিসারিন-ঝিল্লীকে আদর্শ ব'লে ধরা হয়; আলোক-কিরণ প্রতিফলিত ক'রে এদের স্পন্দন নিরীক্ষণ করা যায়। তবে এদের ঘনত্ব, বেধ, টান প্রভৃতি যখন-তখন বদ্‌লে যায় ব'লে, তাদের স্বভাবী

স্পন্দন অস্থির, অনিয়মিত। তাই কাগজ, রবার বা চামড়ার খুব পাতলা পাতকে ঝিল্লী হিসেবে ব্যবহার করা হয়েছে। কিন্তু তাদের কাঠিন্য এবং বেধ অল্পাবিস্তর থাকেই ; তাই তাদের ছদ বলাই সঙ্গত।

ছদের স্পন্দন-নিরীক্ষণের নানা পন্থা আছে। তাদের মধ্যে ক্ল্যাড্‌নি-উদ্ভাবিত পন্থাই (§ ১৩-১০) সরলতম। বেশ বিস্তৃত স-টান ছদের ওপর সুষম ও হাল্কাভাবে খুব মিহি বালি ছড়িয়ে দিয়ে, ছোট নরম হাতুড়ি দিয়ে আস্তে আস্তে টোকা দিতে থাকলে আঘাতবিন্দু থেকে ক্রমান্বয়ে দ্বিমাত্রা ক্ষণতরঙ্গ (pulse) ছড়িয়ে পড়তে থাকে ; কিনারা থেকে প্রতিফলিত হয়ে

চিত্র 12.13—ভিন্ন ভিন্ন সমমেলে ছদের স্পন্দনরীতি

ফিরে এসে তারা উপরিপাতন ঘটিয়ে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি করে। 12.13 চিত্রে ভিন্ন ভিন্ন উপসুরে স্পন্দনরীতির রূপরেখা দেখানো হয়েছে। উপসুরগুলির কম্পাংকশ্রেণী যথাক্রমে 1 : 1.594 : 2.136 : 2.297 ইত্যাদি অনুপাতে থাকছে ; তারা সমমেল নয়। নিস্পন্দরেখা (বৃত্তপরিধি বা বৃত্তব্যাস) সাপেক্ষে এই স্পন্দনরীতিগুলি বর্ণনা করা যায় ; তাদের দু'পাশে সরণ বিষমমুখী (ছবিতে সাদা ও শেডে) হয়। ইস্পাতের খুব পাতলা (০.০০২″ বেধ) ছদকে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা-নিয়ন্ত্রিত চুম্বক দিয়ে স্পন্দিত ক'রে কিম্বা পাতলা

কাচের ছদকে অর্গান-নলের জোরালো শব্দ দিয়ে কাঁপিয়ে বিজ্ঞানীরা এইরকম ক্ল্যাড্‌নি-চিত্র উৎপন্ন করেছেন।

এখন, ছদের বেধ ($\simeq 10^{-4}$ সেমি) ঝিল্লীর তুলনায় অনেক বেশী; তাই যেখানে ঝিল্লী কেবল টানের ক্রিয়ায় কাঁপে, ছদের স্পন্দনে টানের ভূমিকা কম, কাঠিন্যের ভূমিকা, তুলনায় বেশী। পাত বা প্লেটের বেধ আরও বেশী, তাই তার অনুবেধ স্পন্দন (অনুচ্ছেদ ১৩-১০) কেবল কাঠিন্য-শাসিত। তা ছাড়া ঝিল্লীর স্পন্দনে, দু'ধারের মাধ্যমের ভারজনিত অবদমন এবং উপাদানের কাঠিন্য, আদর্শ অবস্থা থেকে যথেষ্ট বিচ্যুতি ঘটায়। তাই বাস্তব কম্পাংক ১২-১৮.১০ সমীকরণ মেনে চলে না।

ছদের তলায় বদ্ধ বায়ুপ্রকোষ্ঠ বসিয়ে তবলা-জাতীয় বাদ্যযন্ত্র (§১৭-১৫) হয়। আবার ১২-১৮.১০ দেখায় যে, ব্যাস ও বেধ কমিয়ে এবং টান বাড়িয়ে মূল কম্পাংক বাড়ানো যায়। সঙ্গীতে গ্রাহ্য কম্পাংকের অনেক বেশীতে স্বভাবী কম্পাংক তুলে দিয়ে এইজাতীয় ছদ টেলিফোনে (§১৫-৫ক) এবং ধারক মাইক্রোফোনে (§১৫-১২) শব্দের সুবেদী গ্রাহক হিসাবে ব্যবহার করা যায়।

প্রশ্নমালা

১। স-টান তারে অনুপ্রস্থ তরঙ্গের গাণিতীয় ব্যঞ্জক নির্ণয় কর। তারে সংকোচন বা অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের কি সমবেগ হওয়া সম্ভব? বুঝিয়ে বলো।

২। দুই প্রান্তে শক্ত ক'রে বাঁধা তারের কোন বিন্দুর সরণের সাধারণ প্রতিরূপ এবং বিশিষ্ট কম্পাংকগুলি নির্ণয় কর। কম্পনশীল তারের শক্তির গাণিতীয় প্রতিরূপ নির্ণয় কর।

৩। স-টান তারের ক্ষেত্রে প্রযোজ্য তরঙ্গ সমীকরণ লেখ এবং দুই প্রান্ত আবদ্ধ ধ'রে নিয়ে ফুরিয়ার-শ্রেণীর আকারে তার সাধারণ সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর।

৪। স্পন্দনশীল তারকে স্থাণু তরঙ্গ হিসাবে বিচার ক'রে তারের স্পন্দন-সূত্রগুলি প্রতিষ্ঠা কর। Melde-র পরীক্ষা দিয়ে সূত্রগুলি কতদূর প্রমাণ করা যায়?

৫। স-টান তারে স্বল্পবিস্তার অনুপ্রস্থ তরঙ্গের ব্যাপ্তির অবকল সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর। সেই সমীকরণের সমাধান লেখ। তা থেকে দুই প্রান্তে আবদ্ধ স-টান তারের কোন বিন্দুতে সরণের প্রতিরূপ প্রতিষ্ঠা কর।

১৩

দণ্ড ও পাতের স্পন্দন

(Vibration of Rods and Plates)

১৩-১. সূচনা :

দণ্ড বলতে আমরা গোল বা চৌকো প্রস্থচ্ছেদের দীর্ঘ **কঠিন বস্তুবিশেষ** বুঝব ; তারা যথাক্রমে রড্ এবং বার ; এদের ব্যাস বা বেধ, দৈর্ঘ্যের তুলনায় ছোট হলেও, নগণ্য নয়। তেমনই অল্প, কিন্তু নগণ্য নয় এমন বেধের ঝিল্লী বা ছদকে, পাত বলে।

দৈর্ঘ্য সাপেক্ষে দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য, অনুপ্রস্থ বা ব্যাবর্ত স্পন্দন হতে পারে ; ফলে তাতে তদনুরূপ শ্রেণীর একমাত্রা সচল তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। দণ্ড সীমিতদৈর্ঘ্য মাধ্যম ব'লে, তার দুই প্রান্তে সচল তরঙ্গের প্রতিফলন বারবারই হবে এবং উপরিপাতনের ফলে স্থাণুতরঙ্গ তথা স্থাণুস্পন্দন ঘটবে। পাতে অনুপ্রস্থ স্পন্দনই মাত্র আমাদের বিচার্য, এতে স্থাণুতরঙ্গ দ্বিমাত্রা। দণ্ড এবং পাত, দুয়েতেই অনুপ্রস্থ স্পন্দন তার দার্ঢ্যধর্মজনিত, ততির কোন ভূমিকা নেই, কেননা **আদর্শ কঠিন বস্তুকে একেবারেই অনমনীয়** ব'লে ধরা হয়।

তার ও ঝিল্লী বনাম দণ্ড ও পাত : এদের ধর্ম ও স্পন্দনরীতিতে তফাৎ অনেক। তারের ব্যাস দৈর্ঘ্যের তুলনায় নগণ্য, দণ্ডের নয়। তার সম্পূর্ণ নমনীয়, দার্ঢ্যধর্মবর্জিত কঠিন তন্তু, তাই তার অনুপ্রস্থ স্পন্দন সম্পূর্ণভাবে ততি-শাসিত ; কাজেই এর স্পন্দনাংক বহিঃপ্রভাবের অধীন। পক্ষান্তরে দণ্ড দীর্ঘ, দৃঢ়, কঠিন বস্তু ব'লে ধরায় এর অনুরূপ স্পন্দন সম্পূর্ণভাবে দার্ঢ্যধর্ম-শাসিত, কাজেই স্পন্দনাংক একেবারেই বহিঃপ্রভাব নিরপেক্ষ এবং স্থিতি-স্থাপকতাংক-শাসিত। ঝিল্লী এবং পাতের অনুপ্রস্থ স্পন্দন সম্বন্ধে ঠিক একই তথ্যগুলি প্রযোজ্য, কেননা প্রথমটিকে বেধহীন আর দ্বিতীয়টিকে অল্পবেধ কঠিন ফলক ব'লে ধরা হয়। তবে সর্তগুলি আদর্শ, অতএব অবাস্তব—বাস্তবে তার ও ঝিল্লীর সামান্য কাঠিন্য থাকবেই, দণ্ড ও পাতে সামান্য নমনীয়তা থাকবেই, সুতরাং প্রথম ক্ষেত্রে স্থিতিস্থাপকতাংক আর দ্বিতীয় ক্ষেত্রে ততি আদর্শ স্পন্দন থেকে অল্পাবিস্তর বিচ্যুতি এনে থাকে। তারের অনুদৈর্ঘ্য বা ব্যাবর্ত স্পন্দনের কোন ব্যবহারিক প্রয়োগ নেই, দণ্ডের ক্ষেত্রে আছে। তার বা রডে

স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ একমাত্রা, ঝিল্লী বা ছদে দ্বিমাত্রা, পাতে ত্রিমাত্রা। তাই পাতের স্পন্দনের গণিতীয় বিশ্লেষণ প্রায়শঃই দুঃসাধ্য, অনেকক্ষেত্রেই সাধ্যাতীত।

দণ্ড ও পাতের স্পন্দনের ব্যবহারিক প্রয়োগঃ বাদ্যজগতের বাইরে তারের স্পন্দন কাজে লাগেই না; দণ্ডের স্পন্দন কিন্তু, বাইরেও কাজে লাগে। কম্পাংক-মানক (frequency standard) হিসাবে সুনির্দিষ্ট দৈর্ঘ্যের দণ্ডের সুনির্দিষ্ট অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনরীতিতে কম্পাংকই গ্রাহ্য হয়। সুরজগতে একমাত্র বিশুদ্ধ সুরোৎসারী যন্ত্র সুরশলাকা; তার শব্দ দণ্ডের অনুপ্রস্থ স্পন্দনজাত। স্বনোত্তর তরঙ্গসৃষ্টিতে (§২০-৩) এবং Kundt নলে (§১৪-৯) দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনই স্বনকের কাজ করে। সমুদ্রতলে সমতলীয় শব্দ বা স্বনোত্তর তরঙ্গ বা SONAR (§২১-৯) তরঙ্গ উৎপাদনে বড় পাতের অনুপ্রস্থ স্পন্দন কাজে লাগানো হয়; এই পাতকে আবার উদ্দীপিত করে নিকেল রডের চৌম্বক তাঁতজনিত অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন। কাঁসর, ঘণ্টা প্রভৃতির শব্দ পাতের অনুপ্রস্থ স্পন্দনজাত।

১৩-২. দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেগ:

রড্ বা বারের এক প্রান্তে সজোরে এক ঘা দিলে সেখানে ক্ষণিকের জন্যে যে সংকোচন ঘটে, সেই অবস্থা দৈর্ঘ্য বরাবর এগোতে থাকে। সংকোচন তরঙ্গের বেগ, পদার্থের ইয়ং-গুণাংক এবং ঘনত্বের ওপর নির্ভরশীল। বিশ্লেষণটি ৬-৩ অনুচ্ছেদে আলোচিত ঘটনারই মতো।

তরঙ্গবেগ বার করতে সরলীকরণের খাতিরে ধ'রে নেওয়া হবে—

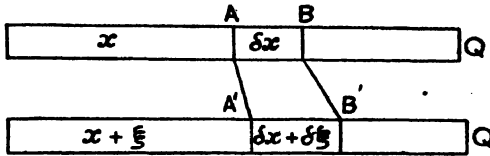
(১) রড্, x-অক্ষ বরাবর বিস্তৃত এবং যথেষ্ট লম্বা;

(২) এই দৈর্ঘ্য এবং উৎপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপে তুলনীয়;

(৩) দৈর্ঘ্যের তুলনায় রড্ এত সরু যে, অনুদৈর্ঘ্য পীড়নে প্রস্থচ্ছেদ বদলায় না;

(৪) আঘাতের ফলে সব প্রস্থচ্ছেদেরই সমান সরণ।

13.1 চিত্রে প্রদর্শিত PQ দণ্ডের প্রস্থচ্ছেদের ক্ষেত্রফল ধরা যাক α, তার উপাদানের ঘনত্ব ρ এবং ইয়ং-গুণাংক q; দণ্ড-অক্ষের সমকোণে দুই প্রস্থচ্ছেদ A এবং B, মূলবিন্দু থেকে যথাক্রমে x এবং $x+\delta x$ দূরত্বে আছে। এবারে P প্রান্তে এক ঘা লাগানো যাক। উৎপন্ন সংকোচন তরঙ্গের ক্রিয়ায়

t অবকাশ পরে A এবং B-র সরণ হয়ে তারা A' এবং B' অবস্থানে পৌঁছবে। এখন $AB=\delta x$ আর $A'B'=\delta x+\delta\xi=\delta x+\left(\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)\delta x$;

চিত্র 13.1—দণ্ডে সংকোচন-তরঙ্গ

অতএব F/α পীড়ন বলের ক্রিয়ায় $(\partial\xi/\partial x)$ পরিমাণ সংকোচনের সৃষ্টি হয়েছে। যদি ধরি A প্রস্থচ্ছেদে বাঁ থেকে ডানদিকে সক্রিয় F ঘাতবলের ক্রিয়ায় A তল A' অবস্থানে সরে গেছে $(AA'=\xi\leqslant\delta x)$, তাহলে B' তলে $F+\delta F$ বল ডান থেকে বাঁয়ে ক্রিয়া ক'রে তাকে B অবস্থানে ফিরিয়ে আনতে চাইছে। তাহলে $A'B'$ দণ্ডাংশের (১) দুই প্রান্তে সমান ও বিপরীত বল F-এর ক্রিয়ায় বিকৃতি হচ্ছে, (২) অপ্রশমিত বল $-\delta F$-এর ক্রিয়ায় স্থানচ্যুত অংশটি AB $(m=\rho.\delta x\alpha)$ অবস্থায় ফিরে আসতে চাইছে। তাহলে দুটি সর্ত থেকে পাব

$$q=\frac{F/\alpha}{-(\partial\xi/\partial x)} \quad \text{বা} \quad F=-q\alpha\frac{\partial\xi}{\partial x} \qquad (১৩\text{-}২.১ক)$$

$$\text{এবং} \quad -\delta F=-\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)\delta x=mf=\rho\alpha\delta x\cdot\left(-\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}\right) \qquad (১৩\text{-}২.১খ)$$

$$\therefore \quad \frac{\partial F}{\partial x}=q\alpha\cdot\frac{\partial}{\partial x}\left(-\frac{\partial\xi}{\partial x}\right)=-\rho\alpha\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} \qquad (১৩\text{-}২.২)$$

$$\text{বা} \quad \frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}=\frac{q}{\rho}\left(\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}\right)=c^2\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2} \qquad (১৩\text{-}২.৩)$$

সুতরাং দণ্ডে সংকোচন তরঙ্গের দশাবেগ $\quad c=\sqrt{q/\rho}$ * $\qquad$ (১৩-২.৪)

দেখ, ৬-২.১ সমীকরণে শব্দচাপ p-র বদলে সংকোচক পীড়ন F/α আর

---

* ধাতুমাত্রেরই q-এর মান 10^{12} ও ρ-এর মান 10 cgs এককের মধ্যে থাকায়, ধাতুদণ্ড-নির্বিশেষে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গবেগ 10^5 সেমি/সে মানের মতো হয়। তাই পিতলে শব্দবেগ 3.15 থেকে 3.45, তামায় 3.80, লোহায় 5.15 থেকে 5.40×10^5 সেমি/সে হয়।

আয়তন-বিকারাংক K-র বদলে ইয়ং-গুণাংক q বসালেই ১৩-২.১ আসে। পরে বিশ্লেষণ-পন্থা অভিন্ন। তবে যত সহজে p মাপা যায় তত সহজে F/α মাপা যায় না।

১৩-৩. দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের অবকল সমীকরণ ও তার সমাধান :

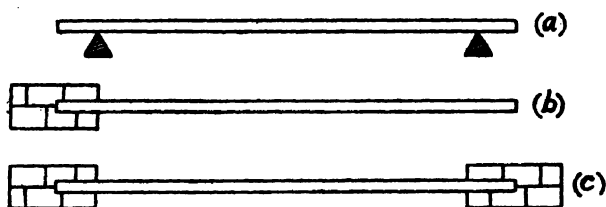
তারে তরঙ্গ-সমীকরণ সমাধানের মতো চলক-বিশ্লেষণ পদ্ধতি অনুসরণে (§১২-৩) এখানেও পাব

$$\xi = f(x, t) = X(x).T(t)$$

$$= \left(A \cos \frac{\omega x}{c} + B \sin \frac{\omega x}{c}\right) (C \cos \omega t + D \sin \omega t)$$

(১৩-৩.১)

প্রান্তিক সর্তাবলী আরোপ ক'রে স্বেচ্ছিক ধ্রুবক A, B, C, D-র মান বার করতে হবে। দণ্ডের বেলায় এই সর্তগুলি সংখ্যায় তিনটি—(১) দুই-প্রান্ত-মুক্ত কিন্তু আধৃত ; (২) এক-প্রান্ত-আবদ্ধ, অপর-প্রান্ত-মুক্ত ; (৩) দুই প্রান্তই আবদ্ধ। ১৩-৩.১ সমীকরণে ω অচর স্পন্দনাংক।

ক. **দুই-প্রান্ত-মুক্ত বার (Free-Free bar) :** [চিত্র 13.2a]— দুই ক্ষুরধারের (knife-edges) ওপর রাখা দণ্ডের দুই প্রান্তই মুক্ত। কাজেই

চিত্র 13.2—বিভিন্ন সর্তাধীনে দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন

দুই প্রান্তেরই অবাধ স্পন্দন সম্ভব, সেখানে পীড়ন (F/α) বা বিকৃতি $(\partial\xi/\partial x)$ থাকতে পারে না। তাহলে t-র সকল মানেই $x=0$ এবং $x=l$ বিন্দুতে $\partial\xi/\partial x = 0$ হবে। তাহলে ১৩-৩.১ থেকে আসবে

$$(\partial\xi/\partial x) = \frac{\omega}{c}\left(B \cos \frac{\omega x}{c} - A \sin \frac{\omega x}{c}\right) (C \cos \omega t + D \sin \omega)$$

(১৩-৩.২ক)

সুতরাং প্রথম প্রান্তিক সর্ত আরোপ ক'রে পাব (আদি নিমেষ ছাড়া $t \neq 0$)

$$0=\frac{\omega B}{c}(C\cos\omega t+D\sin\omega t) \quad \text{বা} \quad B=0 \qquad (\text{১৩-৩.২খ})$$

কেননা স্পন্দনাংক (ω) ও দশাবেগ (c) কেউই শূন্য হতে পারে না।

আবার এই $B=0$ এবং দ্বিতীয় প্রান্তিক সর্ত, ১৩-৩.২ক-তে বসিয়ে পাই

$$0=-\frac{\omega A}{c}(C\cos\omega t+D\sin\omega t)\sin\frac{\omega l}{c} \qquad (\text{১৩-৩.২গ})$$

এখন যেহেতু ω, c, A কেউই শূন্য হতে পারে না, আমরা তাই পাচ্ছি

$$\sin(\omega l/c)=0 \quad \text{অর্থাৎ} \quad \omega l/c=m\pi \qquad (\text{১৩-৩.৩})$$

তাহলে ω-র মান অখণ্ড সাংখ্যমান (m)-নির্ভর। কাজেই প্রতিটি স্বৈচ্ছিক ধ্রুবক এবং নিমেষ-সরণও তাই হবে। সুতরাং ১৩-৩.১ সমীকরণ প্রান্তিক সর্ত-শাসিত হয়ে দাঁড়াবে

$$\xi_m=A_m\cos\frac{m\pi x}{c}(C\cos\omega_m t+D\sin\omega_m t) \qquad (\text{১৩-৩.৪})$$

তারের ক্ষেত্রেও অনুরূপ সমাধান (১২-৪.২) পেয়েছি। m-এর সাংখ্যমান যতগুলি সমাধানও ততগুলিই। সুতরাং তাদের সমাহারেই সার্বিক সমাধান আসবে, অর্থাৎ

$$\xi=\sum_{m=1}^{m=\infty}A_m\cos\frac{m\pi x}{l}(C_m\cos\omega_m t+D_m\sin\omega_m t)$$

এখন ১৩-৩.৩ থেকে দণ্ডের স্পন্দনের বিশিষ্ট বা বিধিবদ্ধ বা অনন্য কম্পাংকগুলির মান হবে

$$\omega_m=\frac{m\pi c}{l} \quad \text{এবং} \quad n_m=\frac{\omega_m}{2\pi}=\frac{mc}{2l}=\frac{m}{2l}\left(\frac{q}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (\text{১৩-৩.৫})$$

অর্থাৎ দুই প্রান্তে মুক্ত দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনে সব সমমেলই থাকবে। স্পন্দনরীতি স-টান তারের সঙ্গে অভিন্ন। নিম্নতম তথা মূল স্পন্দনরীতিতে কম্পাংক ও তরঙ্গদৈর্ঘ্য হবে যথাক্রমে

$$n_1=\frac{1}{2l}\left(\frac{q}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{এবং} \quad \lambda_1=2l \qquad (\text{১৩-৩.৬})$$

খ. দণ্ডের এক প্রান্ত আবদ্ধ, অপর প্রান্ত মুক্ত (Fixed-Free bar) : (চিত্র 13.2b)

এক্ষেত্রে প্রযোজ্য প্রান্তিক সর্ত হবে : সব সময়েই (১) বদ্ধ প্রান্তে ($x=0$) সরণ নেই ($\xi=0$) ; (২) মুক্ত প্রান্তে ($x=l$) অবাধ স্পন্দন অর্থাৎ সেখানে বিকৃতি ($\partial\xi/\partial x=0$) নেই।

প্রথম সর্ত ১৩-৩.১-তে বসালে, $A=0$ হবে ; তার ওপর দ্বিতীয় প্রান্তিক সর্ত জুড়লে, মিলবে

$$\frac{\omega B}{c}\cos\frac{\omega l}{c}(C\cos\omega t+D\sin\omega t)=0 \qquad (১৩\text{-}৩.৭ক)$$

$$\text{বা} \quad \cos\omega l/c=0^* \quad \text{অর্থাৎ} \quad \omega_m l/c=(2m+1)\pi/2$$

$$\therefore \quad n_m=\frac{\omega_m}{2\pi}=\frac{(2m+1)\pi/2}{2\pi}\cdot\frac{c}{l}$$

$$=\frac{(2m+1)}{4l}\left(\frac{q}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (১৩\text{-}৩.৭খ)$$

এক্ষেত্রে মূল সুরের কম্পাংক এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে

$$n_1=c/4l \quad \text{এবং} \quad \lambda_1=4l \qquad (১৩\text{-}৩.৮)$$

আবার দ্বিতীয় সমমেলের কম্পাংক এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে $n_2=3c/4l=3n_1$, $\lambda_2=\frac{4}{3}l$ অর্থাৎ বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডে কেবলমাত্র অযুগ্ম সমমেলের উৎপত্তিই সম্ভব। যদি দণ্ডের মধ্যবিন্দু আবদ্ধ আর দুই প্রান্ত মুক্ত হয়, তাহলে তাকে দুটি বদ্ধমুক্ত দণ্ডের সমাবেশ ধরা যায় এবং তখন

$$n_m'=(2m+1)\frac{c}{2l} \qquad (১৩\text{-}৩.৭খ)$$

হয়। Kundt নলে রডের যে স্পন্দন করানো হয় তা এই শ্রেণীভুক্ত।

গ. দুই প্রান্তে আবদ্ধ দণ্ড (Fixed-Fixed bar) : (13-2c চিত্র)

স্পষ্টতই এই ব্যবস্থা স-টান তারের সঙ্গে অভিন্ন। তাই গণিতীয় বিশ্লেষণ এবং সিদ্ধান্তগুলিও এক রকমের। এখানেও সব সমমেল উৎপন্ন হবার কথা, তবে এই স্পন্দনের ব্যবহারিক গুরুত্ব তেমন নেই।

---

* ১৩-৩.৭ক-তে $B=0$ হলে, তরঙ্গ সমাধানে x- অর্থাৎ দেশাংশ থাকবে না, অর্থাৎ কালসাপেক্ষ স্পন্দনই থাকবে। তা'তে তরঙ্গ হয় না। তা ছাড়া ω, c বা t কেউই শূন্য নয়।

১৩-৪. স্পন্দনশীল দণ্ডে স্থাণুতরঙ্গ :

স্পন্দিত তারকে যেমন স্থাণুতরঙ্গ হিসেবেও দেখা চলে (§১২-৬) এবং কম্পাংকের মান স্পন্দনের বিশ্লেষণের (§১২-৪) সঙ্গে অভিন্ন হয়, দণ্ডের বেলাতেও তাই হয়, কাজেই গণিতীয় বিশ্লেষণও একই রকম। এই বিশ্লেষণও তিনটি সর্তসাপেক্ষ (§১৩-২এ সর্তগুলি দ্রষ্টব্য)—

(১) দণ্ডে সচল তরঙ্গ সমতলীয় এবং তার বদ্ধ বা মুক্তপ্রান্তে প্রতিফলন ;

(২) দণ্ডের ব্যাস তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক ছোট ; এবং

(৩) তরঙ্গের ক্রিয়ায় দৈর্ঘ্যের হ্রাসবৃদ্ধি-সাপেক্ষে, দণ্ডব্যাসের হ্রাসবৃদ্ধি নগণ্য। দণ্ডটি মুক্ত-মুক্ত বা বদ্ধ-বদ্ধ হলে প্রান্তীয় প্রতিফলন সম্পূর্ণ হয়, সরণ নিস্পন্দবিন্দুগুলি প্রায় নিশ্চল হয়, গণিতীয় বিশ্লেষণ ১২-৬ অনুচ্ছেদের মতোই হয় এবং অর্ধ-দৈর্ঘ্য অনুনাদ ঘটে। এখানে সব সমমেলগুলিই আসে। দণ্ডদৈর্ঘ্য যা যা হলে প্রান্তগুলিতে সরণ সুস্পন্দ বা নিস্পন্দবিন্দু হওয়ার কথা, শুধু সেই স্থাণুস্পন্দনগুলিই স্থায়ী হবে।

দণ্ড বদ্ধ-মুক্ত হলে, মুক্ত প্রান্ত থেকে আর প্রতিফলন সম্পূর্ণ হয় না, তখন বিশ্লেষণ খানিকটা আলাদা ধরনের হবে। ধরা যাক, দণ্ডে আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গের প্রতিরূপ যথাক্রমে

$$\xi_1 = a_1 \cos(\omega t - \beta x) \quad \text{এবং} \quad \xi_2 = a_2 \cos(\omega t + \beta x)$$

বদ্ধ প্রান্তে প্রান্তিক সর্ত হবে $\xi_1 + \xi_2 = 0$; সুতরাং $a_1 = -a_2 = a$

তাহলে কোন নিমেষে $x = x$ বিন্দুতে তাদের সমাপতনে উৎপন্ন সরণ,

$$\xi_x = \xi_1 + \xi_2 = a\cos(\omega t - \beta x) - a\cos(\omega t + \beta x)$$
$$= 2a \sin\beta x.\, \sin\omega t \qquad (১৩\text{-}৪.১)$$

এবং সংকোচন $\dfrac{\partial \xi_x}{\partial x} = 2a\beta \cos\beta x.\, \sin\omega t$ (১৩-৪.২)

আবার মুক্ত প্রান্তে $(x = l)$ পীড়ন-বল $(f = F/\alpha)$ সদাই শূন্য।

$$\therefore \quad \frac{F}{\alpha} = q\left(-\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) = 0$$

অর্থাৎ $F_{(x=l)} = -q\alpha.\, 2a\beta \cos\beta l.\, \sin\omega t = 0$ (১৩-৪.৩)

তাহলে, যেহেতু $t \neq 0$, a এবং β অচররাশি,

$$\cos \beta l = 0 \quad \text{অর্থাৎ} \quad \beta l = \frac{\omega l}{c} = (2m+1)\frac{\pi}{2}$$

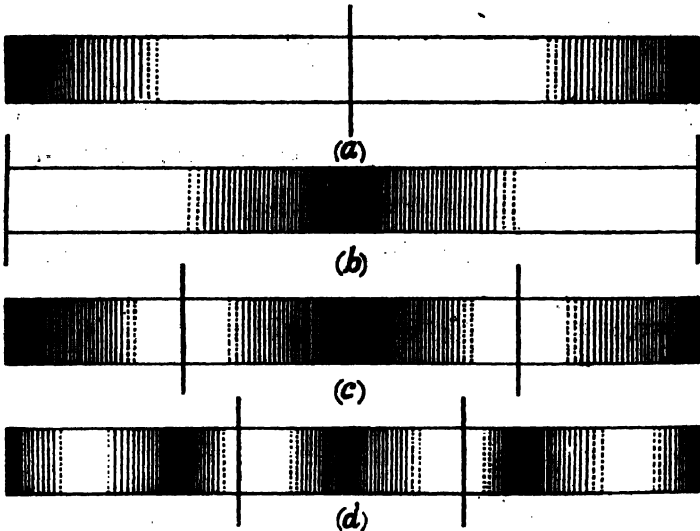
এবং বিধিবদ্ধ বা অনন্য কম্পাংক হচ্ছে

$$n_m = \frac{\omega_m}{2\pi} = (2m+1)\frac{c}{4l} = \frac{(2m+1)}{4l}\left(\frac{q}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (১৩\text{-}৪.৪)$$

১৩-৩.৭খ সমীকরণে আমরা এই ফলই পেয়েছি।

১৩-৫. দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের উদ্দীপন ও

দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ নানা ভাবে উদ্দীপিত করা যায়। দণ্ডের উপাদান, প্রস্থচ্ছেদের আকার এবং আট্‌কানোর ভঙ্গীর ওপর উদ্দীপন-রীতি নির্ভর করে। দণ্ডের উপাদান হতে পারে কাঠ, কাচ বা ধাতু, প্রস্থচ্ছেদ গোল বা চৌকো হতে পারে, তাকে প্রান্তে বা মধ্যবিন্দুতে আট্‌কানো যেতে পারে।

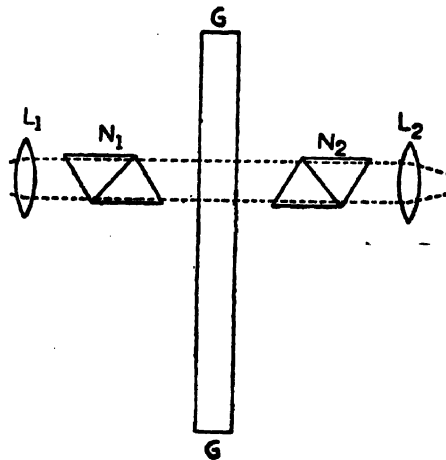
ক. দণ্ড গোল প্রস্থচ্ছেদের হলে জলে-ভেজা বা রজনের গুঁড়ো মাখানো কাপড় কিম্বা চামড়া কিম্বা মিহি বালিকাগজ দিয়ে দণ্ডটি জড়িয়ে ধ'রে দৈর্ঘ্য

চিত্র 13.3—দণ্ডের বিভিন্ন স্পন্দনরীতি

বরাবর সজোরে টেনে, সহজেই অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন উদ্দীপ্ত করা যায়। প্রস্থচ্ছেদ চৌকো হলে, এক প্রান্তে হাতুড়ীর ঘা মেরে বা ঘূরন্ত কর্কশ চাকায় ঘর্ষণে স্পন্দন উৎপন্ন করা হয়। এইজাতীয় দণ্ডের অনুভূমিক পিঠে খুব হালকা ক'রে মিহি বালি সুষম ভাবে ছড়িয়ে রাখলে, নিস্পন্দ রেখাগুলি বরাবর সমান্তরালভাবে বালি জমে। রেখাগুলি দণ্ড-অক্ষের সমকোণে থাকে।

13.3 চিত্রে প্রথম দুটি চিত্রে মধ্যবিন্দুতে এবং দুই প্রান্তে আট্‌কানো কঠিন দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনজাত অবস্থা দেখানো হয়েছে। দুইক্ষেত্রেই মূল কম্পাংকে স্পন্দন $[n=(1/2l)\sqrt{q/\rho}]$ হচ্ছে। (c) এবং (d) চিত্রে আট্‌কানোর জায়গা বদ্‌লে যথাক্রমে দ্বিতীয় ও তৃতীয় সমমেলে স্পন্দন অবস্থা দেখা যাচ্ছে।

Kundt নলের পরীক্ষায় উদ্দীপক রড্‌—ধাতু বা কাচের হয় এবং তাকে ঘষে স্পন্দিত করা হয়। কাচের রড্‌ ফাঁপা নল হ'লে, তার ভেতরে হালকা গুঁড়ো ছড়িয়ে নিস্পন্দ রেখাগুলি চিহ্নিত করা হয়। এখানে রড্‌টিকে মধ্যবিন্দুতে বাঁধা হয়। (চিত্র 21.8 দেখ।)

খ. কাচ-রডে আলোর ধ্রুবণ বা সমবর্তন ধর্ম কাজে লাগিয়ে অনুদৈর্ঘ্য স্থাণুস্পন্দনে উৎপন্ন সরণ-নিস্পন্দবিন্দুগুলির অবস্থান পাওয়া সম্ভব। এরই ম্যাক্‌-উদ্ভাবিত পন্থাটি 13.4 চিত্রে দেখানো হয়েছে। এখানে রডের অক্ষ, দুই

চিত্র 13.4—কাচদণ্ডে স্থাণুতরঙ্গের নিরীক্ষণ-ব্যবস্থা

ক্রসিত নিকলের (crossed nicol prism) মধ্যে আলোক-পথের আড়াআড়ি ভাবে থাকে। একরঙা আলোর সমান্তরাল কিরণ প্রথম নিকলের (N_1)

ক্রিয়ায় সমবর্তিত হয়ে দণ্ড এবং বিশ্লেষক নিকলের মধ্যে দিয়ে যায় এবং L_2 লেন্সের সাহায্যে তাকে সংহত করা হয়; তারপর দ্বিতীয় নিকল (N_2) ঘুরিয়ে ঘুরিয়ে আলো নির্বাপিত করা হয়। দণ্ডে স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন ক'রে এমনভাবে রাখা হয় যাতে সরণ-নিস্পন্দ অঞ্চল আলোক-কিরণের পথেই থাকে। তখন দেখা যাবে যে, পর্দায় আলো পুনরাবির্ভূত হয়েছে; কেননা ঐ অঞ্চলে চাপ-পরিবর্তন সর্বাধিক (§৫-১৪) হওয়ায় কাচের ঘনত্ব তথা আলোক-প্রতিসরাংক পাল্টে গেছে। দণ্ডের এই অংশে সরণ-সুস্পন্দ অঞ্চল থাকলে বা স্পন্দন মোটেই না হলে, পর্দা অন্ধকারই থাকবে। দণ্ডে সাদা আলো পড়লে পর্দায় রঙিন ব্যতিচার পটি দেখা দেয়। স্পন্দনশীল দণ্ডে ঘনত্বের পর্যাবৃত্ত পরিবর্তন হতে থাকে; তাতে ব্যাণ্ড বা পটিগুলির স্পন্দন হতে থাকে এবং তার সচল আলোকচিত্র নেওয়া যায়।

গ. **ধাতু-নির্মিত দণ্ডের** এক প্রান্ত সমতল এবং তার আটক-বিন্দু মাঝখানে হলে, বৈদ্যুতিক পন্থায় অনুদৈর্ঘ্য স্থাণুস্পন্দন সৃষ্টি করা সম্ভব। প্রান্তের সমান্তরালে আর একটি ধাতুপাত রাখলে, দণ্ডের সঙ্গে বৈদ্যুতিক ধারক তৈরী হয়; স্পন্দনী ভাল্‌ভ্‌-বর্তনী থেকে উচ্চ কম্পাংকের বিভবভেদ দণ্ডে ও পাতে প্রয়োগ ক'রে দণ্ডে যেকোন কম্পাংকের স্পন্দন উদ্দীপিত করা সম্ভব।

ঘ. **প্র-চুম্বকীয়** (ferromagnetic) **দীর্ঘ দণ্ডকে** মধ্যবিন্দুতে আটকে এবং প্রত্যাবর্তী ধারাবাহী কুণ্ডলীর মধ্যে রেখে, তার দৈর্ঘ্যের হ্রাসবৃদ্ধি ঘটানো যায়; এই চৌম্বকতাতি (magnetostriction) ঘটনা কাজে লাগিয়ে নিকেল রড্ দিয়ে **স্বনোত্তর স্পন্দন** সৃষ্টি করানো (§২০-৩) হয়। আগেরটির মতোই উচ্চ কম্পাকে প্রবল বিশুদ্ধ অনুনাদী অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন উৎপন্ন করা যায়।

অনুরূপভাবে, প্র-বৈদ্যুতিক কোয়াৎ'জ স্ফটিকেও প্রবল অনুনাদী স্থাণু স্পন্দন (§২০-৪) উৎপন্ন করা যায়। তাতেও স্বনোত্তর তরঙ্গ হয়।

১৩-৬. দণ্ডে নমনজাত (Flexural) অনুপ্রস্থ স্থাণু স্পন্দন:

এক প্রান্তে আবদ্ধ সরু কোন দণ্ডের মুক্ত প্রান্ত (অর্থাৎ ক্যান্টিলেভার) বলপ্রয়োগে নামালে (চিত্র 13.5a) তার বংকন ঘটে এবং ছেড়ে দিলে সেই প্রান্তের অনুপ্রস্থ স্পন্দন (১-১১.৭) হয়; কেননা বংকন-ভ্রামক, নমিত বিন্দুতে প্রত্যানয়ক বল উৎপন্ন করে; ভ্রামক, বিন্দুর স্থানীয় সরণের চতুর্থ ক্রমের ফলন। বাঁকানো দণ্ডের উদাসীন অক্ষের একপাশের তাতি দৈর্ঘ্যপ্রসারণ-জনিত,

তার অপর পাশের তাঁত সংকোচনজাত, অতএব প্রযোজ্য স্থিতিস্থাপকতাংক হবে দণ্ডের উপাদানের ইয়ং-গুণাংক। আমরা বার্টনের বিশ্লেষণ-পন্থায় চলবো।

ক. অবকল সমীকরণ: দণ্ডের বদ্ধ প্রান্ত থেকে x দূরত্বে তার অক্ষের সমকোণে f বল প্রয়োগ করলে সেই প্রান্তসাপেক্ষে fx পরিমাণ বংকন-ভ্রামকের উৎপত্তি হবে। দণ্ডের যে বিন্দুতেই এই বল প্রয়োগ করা হোক না কেন, অণুগুলির আসক্তি-ধর্মের কারণে দণ্ডের সর্বত্রই অল্প-বিস্তর নমন (depression) হবে। কাজেই বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডের মুক্ত প্রান্ত নামলেই দণ্ডের সর্বত্রই নানা মাপের প্রত্যানয়ক বংকন-ভ্রামকের উৎপত্তি হবে—প্রতিটিরই মান $=$ বিচারাধীন বিন্দুতে সক্রিয় বল $\times$ বদ্ধ প্রান্ত থেকে বিন্দুর দূরত্ব। সুতরাং মোট কার্যকর বল এবং ভ্রামক হবে এদেরই যোগফল, অর্থাৎ

$$F=\sum f \text{ আর } M=\sum fx\,; \quad \therefore\; F=\frac{\partial M}{\partial x} \text{ এবং } \frac{\partial F}{\partial x}=\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}$$

কার্যকর অবকল সমীকরণের প্রতিষ্ঠা তিনটি সর্তসাপেক্ষ—(১) দণ্ডের প্রস্থচ্ছেদ সর্বত্র সুষম; (২) দণ্ডের অক্ষ বরাবর কোন বলই নেই; (৩) স্পন্দন-বিস্তার এত অল্প, যেকোন অংশের ঘূর্ণন নগণ্য ধরা যায়।

13.5(a) চিত্রে বাঁকানো দণ্ডের বদ্ধ প্রান্ত থেকে x দূরত্বে δx দৈর্ঘ্যাংশ আলোচনাভুক্ত করা যাক। তার দুই প্রান্ততল উদাসীন অক্ষের সমকোণে

চিত্র 13.5(a)—ক্যান্টিলেভার বংকন

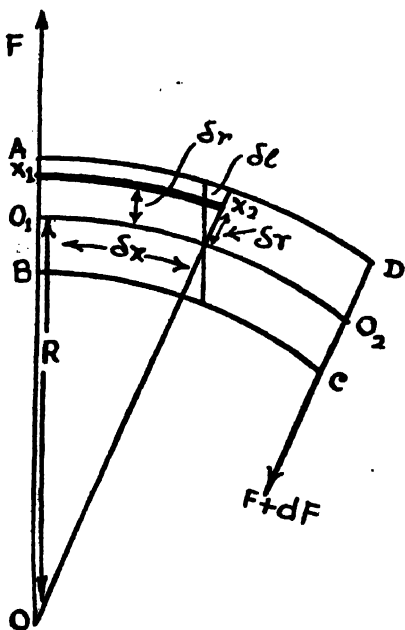
থাকবে। মুক্ত প্রান্তে W বল প্রয়োগ ক'রে তাকে অল্প নমিত করলে দণ্ডের প্রতিটি বিন্দুতে ঋজুতাপ্রয়াসী (straightening) প্রতিক্রিয়া বলের উদ্ভব হবে। ধরা যাক, δx দৈর্ঘ্যাংশের দুই ধারে তারা যথাক্রমে F এবং $F+dF$ হচ্ছে। দুই সমান বল F-এর ক্রিয়ায় বংকন-বিকৃতি ঘটবে এবং তাদের অন্তর, $-dF\;[=-(\partial F/\partial x)\delta x]$ বলটি ঋজুতাপ্রয়াসী প্রত্যানয়ক।

বাঁকা δx অংশের ওপর সক্রিয় বংকন-ভ্রামকের মান বার করতে, ধরা যাক, যে ঋজু অবস্থায় দণ্ডের উদাসীন অক্ষ x-বরাবর থাকবে আর তার নমন (y)

নিচের দিকে ধনাত্মক। দণ্ডের বংকন অল্প, সুতরাং তার উদাসীন অক্ষ একটি দীর্ঘ ব্যাসার্ধের (R) চাপের রূপ নেবে।

$$\frac{1}{R}=\frac{\partial^2 z/\partial x^2}{(1+\partial y/\partial x)^{\frac{3}{2}}}\simeq\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\,*$$

চিত্র 13.5(b)—বংকাংশের খুঁটিনাটি

13.5(b) চিত্রে δx অংশটিকে বড় ক'রে দেখানো হয়েছে। দণ্ডের উদাসীন অক্ষাংশ O_1O_2 অপ্রসারিত। দণ্ডের এই $ABCD$ অংশের DC তল বরাবর $F+dF$ বল একে নিচের দিকে বাঁকাবার চেষ্টা করছে, আর BA তল বরাবর F প্রতিক্রিয়া বল দণ্ডকে সোজা করার প্রয়াস পাচ্ছে। এদের ক্রিয়ায় কৃন্তনের উৎপত্তি হয়ে O_1O_2-র নীচের তন্তুগুলি লম্বায় ছোট আর ওপরের তন্তুগুলি বড় হয়েছে। এখন ধরা যাক, O_1O_2 থেকে δr দূরত্বের X_1X_2 তন্তু বা ফালিটি লম্বায় δl পরিমাণ বেড়েছে। সদৃশ ত্রিভুজের ধর্ম থেকে আমরা পাব

$$\frac{R+\delta r}{\delta x+\delta l}=\frac{R}{\delta x}=\frac{\delta r}{\delta l}\quad\therefore\quad\frac{\delta l}{\delta x}=\frac{\delta r}{R}$$

এখন ফালিটির প্রস্থচ্ছেদ যদি δS ধরা যায়, তাহলে ইয়ং-গুণাংক,

$$q=\frac{F/\delta S}{\delta l/\delta x}\quad\therefore\; F=q\delta S\frac{\delta l}{\delta x}=q\delta S\,\frac{\delta r}{R}=q\delta S\delta r\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$$

সুতরাং উদাসীন অক্ষ সাপেক্ষে $ABCD$ দণ্ডাংশের ওপর সক্রিয় বংকন-ভ্রামক

$$M=\sum fx=\sum\left(q.\delta S.\delta r\;\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)\delta r$$

$$=q\,\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\sum\delta S.(\delta r)^2=q\,\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\,S\times\kappa^2$$

* দেবীপ্রসাদ রায়চৌধুরী -কৃত 'পদার্থের ধর্ম' (দ্বিতীয় সংস্করণ), ৩১৭ পৃষ্ঠার শেষ দুই সমীকরণ

[এখানে S দণ্ডের প্রস্থচ্ছেদ এবং κ উদাসীন অক্ষসাপেক্ষে আবর্তন-ব্যাসার্ধ]

এখন $ABCD$-দণ্ডাংশের ওপর ঋজুতাপ্রয়াসী বল হবে

$$-dF=-\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right) O_1O_2=-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}\cdot O_1O_2=-qS\kappa^2\,\frac{\partial^4 z}{\partial x^4}\,O_1O_2$$

আবার, $dF=$ ভর $\times$ ত্বরণ $=\rho S\ O_1O_2\left(-\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}\right)$

$$\therefore\quad \frac{\partial^4 z}{\partial x^4}qS\kappa^2.\ O_1O_2=-\rho S\ O_1O_2\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

$$\text{বা}\quad \frac{\partial^4 z}{\partial x^4}+\frac{\rho}{q\kappa^2}\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}=0 \qquad (১৩\text{-}৬.১)$$

এটি দণ্ডে নমনজাত অনুপ্রস্থ তরঙ্গের অবকল সমীকরণ।

খ. সমীকরণের সমাধান : যেকোন সমতলীয় তরঙ্গের গাণিতীয় সমীকরণ $z=Ze^{j(\omega t-\beta x)}$ ব'লে ধরা যায়। তাহলে

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2}=-\omega^2 z \quad \text{এবং} \quad \frac{\partial^4 z}{\partial x^4}=\beta^4 z \qquad (১৩\text{-}৬.২)$$

এই দুই মান অবকল সমীকরণে বসালে, পাওয়া যাবে

$$\omega^2 z\ \rho/q\kappa^2=\beta^4 z \qquad (১৩\text{-}৬.৩)$$

এখন ১৩-৬.২-তে যদি $z=A'e^{\alpha x}$, সমাধান ধরা যায় তাহলে α হবে β^4-এর বীজ এবং তার মান $\pm\beta$ বা $\pm j\beta$ হবে। তাহলে

$$z=Ze^{j(\omega t-\beta x)}=Ze^{j\omega t}.e^{-j\beta x}$$

$$=(A\cosh\beta x+B\sinh\beta x$$
$$+C\cos\beta x+D\sin\beta x)\cos\omega t$$

$$=(A\cosh\omega x/c+B\sinh\omega x/c$$
$$+C\cos\omega x/c+D\sin\omega x/c)\cos\omega t \qquad (১৩\text{-}৬.৪)$$

গ. তরঙ্গ-বেগ : ১৩-৬.৩-তে $\beta=\omega/c'$ মান বসালে, দাঁড়াবে

$$\rho/q\kappa^2=\omega^2/c'^4 \quad \text{বা} \quad c'^4=\omega^2\kappa^2\ q/\rho$$

$$\text{বা}\quad (c')^2=\omega\kappa c_1 \qquad (১৩\text{-}৬.৫)$$

এখানে c_l দণ্ডমাধ্যমে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেগ; অনুপ্রস্থ তরঙ্গের দশাবেগ (c') দণ্ডের তাহলে কম্পাংক-নির্ভর। তাই দণ্ডে একযোগে একাধিক স্পন্দন উদ্দীপিত হলে, তরঙ্গবেগ দলবেগের সমান এবং $c' = \partial n/\partial\beta$ হবে।

ঘ. দণ্ডে নমনজাত স্পন্দনের বিশিষ্ট কম্পাংক: এইগুলি প্রান্তিক-সর্তাবলী-নিয়ন্ত্রিত স্পন্দনরীতির ওপর নির্ভর করে। প্রান্ত মুক্ত হলে সেখানে সরণ-সুস্পন্দ এবং নিস্পন্দবিন্দুও থাকতে পারে; কম্পাংক বেগ-নির্ভর ব'লে উপসুরগুলি সমমেল হবে না। সম্ভাব্য প্রান্তিক অবস্থাগুলি তিন রকমের যেকোন একটি হতে পারে—

(১) **প্রান্ত আবদ্ধ:** সেখানে দণ্ডের সরণ বা নতি কোনটাই হতে পারে না, অর্থাৎ $z=0$ এবং $(\partial z/\partial x)=0$ হবে।

(২) **প্রান্ত মুক্ত:** সেখানে সরণ এবং নতি যেকোন মানের হতে পারে কিন্তু প্রান্তবহির্ভূত বংকন-ভ্রামক বা কৃন্তক বল (shearing force) থাকতে পারে না; অর্থাৎ $M=0$,

$$\text{তাই } \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}=0 \text{ এবং } f=\frac{\partial M}{\partial x}=0\text{; তাহলে}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[q.S\kappa^2\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}\right)\right]=0;$$

$$\therefore\quad \frac{\partial^3 z}{\partial x^3}=0 \quad (\text{কেননা } q, S, \kappa^2 \text{ সকলেই অচর রাশি})$$

(৩) **প্রান্ত আধৃত:** সেখানে সরণ বা বক্রতা থাকতে পারে না, অর্থাৎ $z=0$ এবং $\partial^2 z/\partial x^2=0$ হবে।

এদের মধ্যে আমরা অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের মতোই কেবল বদ্ধ-মুক্ত, মুক্ত-মুক্ত আর দুই প্রান্ত ক্ষুরধারে (knife-edge) আধৃত—এই তিনরকম দণ্ডের স্পন্দন আলোচনা করবো; এদের ক্ষেত্রেই বিশিষ্ট কম্পাংক-নির্ণয় দুরূহ কাজ। ১৩-৬.৪ সমাধানে ফলনগুলি পরাবৃত্তিক (hyperbolic) হওয়ায় নিস্পন্দ-বিন্দুগুলির ব্যবধান $\frac{1}{2}\lambda$-র সমান হয় না, তাই উপসুরগুলি অসমমেল এবং স্বল্পায়ু হয়; তাদের দ্রুত অবদমনের ফলেই বিশুদ্ধ মূলসুর তাড়াতাড়ি প্রতিষ্ঠিত হয়। এবার উল্লিখিত দণ্ডগুলির স্পন্দনরীতির আলোচনা:

(১) বদ্ধ-মুক্ত দণ্ড : এক্ষেত্রে প্রান্তিক সর্তগুলি হচ্ছে, বদ্ধ প্রান্তে সরণ এবং নতি নেই, মুক্ত প্রান্তে বংকন-ভ্রামক এবং কৃন্তক-বল নেই ; অর্থাৎ

$$x=0 \text{ প্রান্তে } \quad z=0 \text{ এবং } (\partial z/\partial x)=0 ;$$

$$x=l \text{ প্রান্তে } \quad \partial^2 z/\partial x^2=0 \text{ এবং } \partial^3 z/\partial x^3=0$$

১৩-৬.৪ সমাধানে এই সর্তগুলি বসালে, মিলবে

$$\cosh(\omega l/c')\cos(\omega l/c') = -1$$

$$\text{বা} \quad \cosh(\omega l/c') = -\sec(\omega l/c')$$

$$\therefore \quad \cot(\omega l/c') = \pm\tanh(\omega l/2c') \qquad (\text{১৩-৬.৬ক})$$

এর সমাধান করতে $\omega l/2c'$-কে ভুজ এবং $\cot(\omega l/c')$ এবং $\tanh(\omega l/2c')$-কে কোটি নিয়ে লেখচিত্র টানা হয় ; তাদের ছেদবিন্দুগুলির ভুজের মানই সমীকরণের সমাধান। আমরা পাই

$$\omega l/2c' = \tfrac{1}{4}\pi(1.194,\ 2.998,\ 5,\ 7, \cdots) \qquad (\text{১৩-৬.৬খ})$$

$$\therefore \quad \frac{\omega^2}{c'^2} = \frac{\pi^2}{4l^2}\left[(1.194)^2, (2.998)^2, 5^2, 7^2, \cdots\right]$$

কিন্তু ১৩-৬.৫ থেকে $c'^2 = \omega c_l \kappa$

$$\therefore \quad \frac{\omega^2}{c'^2} = \frac{\omega}{\kappa c_l} = \frac{\pi^2}{4l^2}\left[(1.194)^2, (2.998)^2, 5^2, 7^2, \cdots\right]$$

$$\therefore \quad n_1 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c_l \kappa\pi}{8l^2}\left[(1.194)^2, (2.998)^2, 5^2, 7^2, \cdots\right]$$

(১৩-৬.৭)

অতএব কম্পাংক দণ্ডদৈর্ঘ্যের বর্গের বিষমানুপাতে বদলায় ; উপসুরগুলি মোটামুটি অসমমেল, সুতরাং কর্কশ হয়।

(২) মুক্ত-মুক্ত দণ্ড : এখানে কোন প্রান্তেই বংকন-ভ্রামক (M) এবং কৃন্তক-বল ($\partial M/\partial x$) থাকে না, সুতরাং $x=0$ এবং $x=l$, দুই বিন্দুতেই

$$\partial^2 z/\partial x^2=0 \text{ এবং } \partial^3 z/\partial x^3=0$$

এই সর্তগুলি ১৩-৬.৪ সমাধানে বসালে, পাওয়া যাবে

$$\cosh(\omega l/c')\cos(\omega l/c') = 1$$

$$\text{বা} \quad \tan(\omega l/2c') = \pm\tanh(\omega l/2c')$$

আগের মতোই লেখচিত্র এঁকে সমাধান করতে হয়। তখন পাই

$$\frac{\omega l}{2c'} = \frac{\pi}{4}(3.0112, 5, 7, 9, \cdots)$$

আবার c'-এর মান বসিয়ে কম্পাংকের জন্য পাচ্ছি

$$n_2 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pi c_l K}{8l^2}[(3.0112)^2, 5^2, 7^2, 9^2, \cdots] \quad (১৩\text{-}৬.৮)$$

এক্ষেত্রেও সিদ্ধান্তগুলি ওপরের মতোই। মূল বা নিম্নতম কম্পাংকে স্পন্দিত দণ্ডের দুই নিস্পন্দবিন্দু নিকটতম প্রান্ত থেকে $0.224l$ দূরত্বে থাকে।

(৩) **দুই-প্রান্ত-আবৃত ঃ** এখানে দুই প্রান্তেই সরণ (z) এবং বক্রতা ($\partial^2 z/\partial x^2$) শূন্যই থাকবে। এখন ১৩-৬.৪ সমাধানে বিস্তার-অংশে

$$[A \cosh \omega x/c' + B \sinh \omega x/c' + C \cos \omega x/c' + D \sin \omega x/c']$$

প্রান্তিক সর্ত $x=0$ বিন্দুতে $z=0$ এবং $(\partial^2 z/\partial x^2)=0$ বসালে, আসবে যথাক্রমে $A+C=0$ এবং $A-C=0$, অর্থাৎ A এবং C দুই ধ্রুবকই শূন্য। তাই বিস্তার-মান $B \sinh (\omega x/c') + D \sin (\omega x/c')$ হয়ে দাঁড়াচ্ছে। এবারে দ্বিতীয় প্রান্তিক সর্ত $x=l$ বিন্দুতে, $z=0$ বসালে

$$B \sinh (\omega l/c') + D \sin (\omega l/c') = 0$$

এবং $(\partial^2 z/\partial x^2)=0$ বসালে, $B \sinh (\omega l/c') - D \sin (\omega l/c') = 0$

$$\therefore \quad 2D \sin (\omega l/c') = 0$$

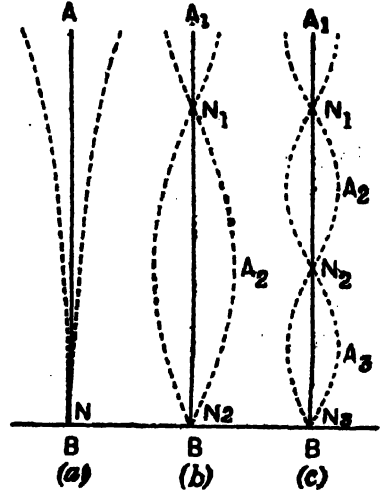
এখন যেহেতু $D \neq 0$ হতে পারে না, সেইহেতু $\sin \omega l/c' = 0$ হবে

অর্থাৎ $\quad \omega l/c' = m\pi$; এবং $n_3 = \dfrac{mc'}{2l} = \dfrac{m\sqrt{\omega c_1 K}}{2l} \quad (১৩\text{-}৬.৯)$

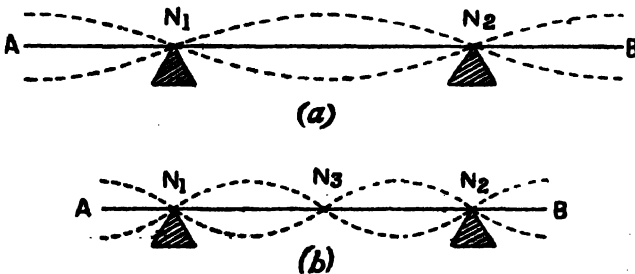
তাহলে উপসুরগুলির নিস্পন্দবিন্দুগুলি সমব্যবধান এবং ব্যাপারটা স্পন্দনশীল তারের মতোই হচ্ছে। এখানে কম্পাংক $\omega^{\frac{1}{2}}$-এর এবং 1, 4, 9 ইত্যাদির সমানুপাতিক।

(৪) **দুই প্রান্ত আবদ্ধ** থাকলে দণ্ডের কম্পন মুক্ত-মুক্ত দণ্ডের মতোই হবে। এদের মূল কম্পাংক (১৩-৬.৮) সমদৈর্ঘ্য বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডের মূল কম্পাংকের (১৩-৬.৭) চেয়ে 2.67 অষ্টক উর্ধ্বে থাকে। দণ্ডের সবরকম নমনজাত উপসুরগুলি বিষমমেল হওয়াতে বাদ্যযন্ত্রে দণ্ড বা পত্রীর নমনের ব্যবহার সামান্যই। তবে ১৭-১৬খ অনুচ্ছেদে পত্রী-চালিত অর্গান-নলের বর্ণনা আছে।

দণ্ডে অনুপ্রস্থ স্পন্দনরীতি : এদের মধ্যে কম্পাংকমানক হিসাবে বদ্ধমুক্ত এবং আধৃত দণ্ডের অনুপ্রস্থ স্পন্দনের ব্যবহারিক প্রয়োগ আছে। 13.6 চিত্রে বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডের মুক্ত প্রান্তের অনুপ্রস্থ সরণ ঘটিয়ে প্রথম তিনটি সুরোৎপাদী স্থাণুস্পন্দনরীতি দেখানো হয়েছে ; তাদের কম্পাংক যথাক্রমে, n_0, n_1 $(=6.27n_0)$ এবং n_2 $(=17.55n_0)$; হয়। নিস্পন্দ ও সুস্পন্দবিন্দুগুলির অবস্থান N এবং A চিহ্নিত ; (§ ১৪-২-এ বদ্ধ নলে বায়ুস্তম্ভের স্থাণু স্পন্দনের সঙ্গে তুলনা কর)। দেখাই যাচ্ছে যে, তারা বিষমমেল, কাজেই স্বল্পস্থায়ী। ১৩-৬.৭ অনুযায়ী এক্ষেত্রে সম্ভাব্য কম্পাংক

$$n=\frac{K\kappa}{l^2}\sqrt{q/\rho} \quad (\text{১৩-৬.১০})$$

চিত্র 13.6—বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডে অনুপ্রস্থ স্পন্দনরীতি

এখানে K, দণ্ডের বন্ধনপদ্ধতি এবং উৎপন্ন উপসুরের ওপর নির্ভরশীল এক অচররাশি, l দণ্ডদৈর্ঘ্য, κ তার খাড়া-অক্ষ-সাপেক্ষে আবর্তন-ব্যাসার্ধ।

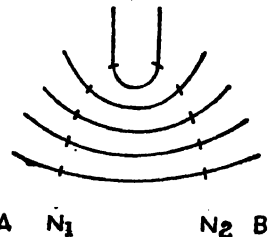
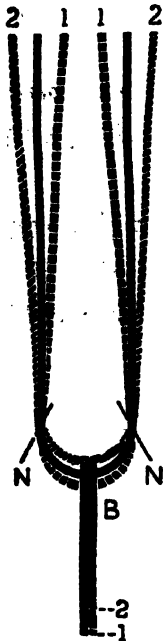
আধৃত দণ্ডের মধ্যবিন্দুতে আড়াআড়ি আঘাতে উৎপন্ন নিম্নতম দুই কম্পাংকে স্পন্দনরীতি 13.7 চিত্রে দেখানো হয়েছে। আধার হিসেবে ব্যবহৃত ক্ষুরধার, দুই প্রান্ত থেকে $0.224l$ দূরত্বে রাখা রয়েছে। মূল কম্পাংকে স্পন্দনরত

চিত্র 13.7—আধৃত দণ্ডে অনুপ্রস্থ স্পন্দনরীতি

দণ্ডটিকে দুই মুক্ত-মুক্ত দণ্ডের সমাহার ব'লে ধরা যায় ; এখানে দুই প্রান্ত ও মধ্যবিন্দুতে তিনটি সুস্পন্দ আর দুই আধারে দুই নিস্পন্দবিন্দু থাকে।

স্পন্দনশীল দণ্ডের মধ্যবিন্দু ছুঁলে, সেখানে তৃতীয় নিস্পন্দবিন্দুর উৎপত্তি হয় এবং দ্বিতীয় উপসুর $n_1(=2.76n_0)$ বাজতে সুরু করে। উচ্চতর উপসুরগুলি $5.40n_0$, $8.93n_0$ কেউই সমমেল নয়।

১৩-৭. সুরশলাকা :

বিশুদ্ধ সুরোৎসারী এবং যথার্থ কম্পাংক-মানক হিসাবে সুরশলাকা অপ্রতিদ্বন্দ্বী স্বনক। একে U অক্ষরের আকারে বাঁকানো স্পন্দনশীল ইস্পাত-দণ্ড বলা যায়। তত্ত্বের দিক দিয়ে এই স্পন্দনকে একটি মুক্ত-মুক্ত দণ্ডের বা দুটি বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডের দৃঢ় সমন্বয়ের স্পন্দন ব'লে ধরা চলে।

13.8 চিত্রে মূলরীতিতে স্পন্দনশীল আধৃত দণ্ডকে ধাপে ধাপে বেঁকিয়ে U আকারে আনলে, আগের চিত্রে নির্দেশিত দুই নিস্পন্দবিন্দু N_1 এবং N_2 কেমনভাবে কাছে আসে, তা দেখানো হয়েছে। এই বংকনের ফলে দণ্ডের স্পন্দনশীল অংশের দৈর্ঘ্য বাড়ে, সুতরাং ১৩-৬.১০ অনুসারে কম্পাংক ক'মে প্রায় দুই-তৃতীয়াংশ হয়ে যায় এবং মধ্য সুস্পন্দবিন্দুর স্পন্দনবিস্তারও কমে। বাহু-দুটি সমান্তরাল হলে স্পন্দন-কালে তারা একযোগে—হয় ভেতরদিকে আসে (13.9a চিত্রে 1, 1), না-হয় বাইরের দিকে (2, 2) যায়। এখন মধ্যবিন্দুতে (B) ডাঁটি লাগালেই সুরশলাকা হয়ে যায় এবং স্পন্দনের সময়ে ডাঁটিটি পর্যায়ক্রমে ওপরে (1) ওঠে এবং নীচে নামে—অর্থাৎ সুরশলাকার বাহুর অনুপ্রস্থ স্পন্দন ডাঁটির অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনে রূপান্তরিত হয়। এটি লাগানোর ফলে N_1, N_2 প্রায় গায়ে গায়ে এসে যায় এবং B-তে স্পন্দনবিস্তার আরও কমে (ছবিতে স্পষ্টতার খাতিরে তাদের বাড়িয়ে দেখানো হয়েছে)।

চিত্র 13.8—আধৃত দণ্ড থেকে সুরশলাকা

চিত্র 13.9(a) সুরশলাকার মূলরীতিতে

এই ব্যাপারের সুবাদেই, র‍্যালে এই স্পন্দনের বিকল্প ব্যাখ্যায় সুরশলাকাকে একটি ভারী ধাতুর আসনে দৃঢ়ভাবে আটকানো দুটি প্রতিসম এবং অবিকল বদ্ধ-মুক্ত দণ্ড-সমন্বয়

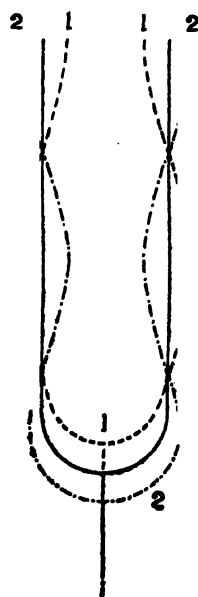
বলেছেন। বাহু-দুটির গতি সবসময়েই বিপরীতমুখী ব'লে তারা ধাতুর আসনে সমান ও বিপরীত বল প্রয়োগ করায় ভারকেন্দ্র অবিচলিত থাকবে এবং তাকেই দুই দণ্ডের বদ্ধ প্রান্ত ব'লে ধরা যাবে। কিন্তু এই বিন্দুর আবার কিছুটা বৃত্তচাপীয় গতি থাকায় অল্প সরণ হয়; সরণ-মান, বাহুর দৈর্ঘ্য (l) ও আসনসাপেক্ষে ভর এবং উপাদানের দৃঢ়তার উপর নির্ভর করে। মূল কম্পাংক, b-প্রস্থের বদ্ধ-মুক্ত দণ্ডের কম্পাংকের ($=\kappa bc_l/l^2$) সমান এবং স্পন্দন অভিমুখের সমকোণে দণ্ডের বেধ- নিরপেক্ষ। এই কম্পাংকের মান ১৫-২ অনুচ্ছেদে বার করা হয়েছে।

সুরশলাকার বাহুপ্রান্তে ছোট কাঠের হাতুড়ি দিয়ে আস্তে আঘাত ক'রে, বেহালার ছড় টেনে বা আঙুল দিয়ে সরণ ঘটিয়ে (অর্থাৎ তারের মতোই) স্পন্দন উদ্দীপ্ত করলে মূল কম্পাংকে বিশুদ্ধ সুর বাজে। জোরে উত্তেজিত করলে বিষমমেল উপসুর ($6.25n_0$, $17.34n_0$,$\cdots$) জাগে—তারা দুর্বল ও স্বল্পায়ু।

১৩-৮. দণ্ডে অনুপ্রস্থ স্পন্দনের উদ্দীপন ও নিরীক্ষণ:

তারের মতো দণ্ডেও টংকার, আঘাত বা ছড়ের ক্রিয়ায় অনুপ্রস্থ স্পন্দন উৎপন্ন ক'রে শব্দসৃষ্টি করা যায়। এখানেও উদ্দীপনবিন্দু এবং ঐ পদ্ধতির ওপরে উৎপন্ন উপসুরগুলি নির্ভর করে। যেমন 13.7(a) চিত্রে আধারদ্বয় দণ্ডপ্রান্ত থেকে $(9/40)l$ দূরে আছে এবং মধ্যবিন্দুতে রবার-ঢাকা হাতুড়ি দিয়ে মৃদু আঘাত করা হয়েছে; এবং 13.7(b) চিত্রে আধারদ্বয়ের প্রান্ত থেকে দূরত্ব $(9/36)l$ এবং দণ্ডের একপ্রান্তে ছড় টেনে তাকে উদ্দীপিত করা হয়েছে। দণ্ডের স্পন্দনজাত উপসুর উৎপত্তির ক্ষেত্রেও ইয়ং-সূত্র প্রযোজ্য।

চিত্র 13.9(b)—সুরশলাকার প্রথম উপসুর

তড়িৎ-চুম্বকের সাহায্যেই সবচেয়ে সহজে দণ্ডে স্পন্দনের উদ্দীপন এবং লালন সম্ভব। প্রত্যাবর্তী ধারাবাহী বিদ্যুৎ-চুম্বকে অনুনাদী কম্পাংকের চুম্বকন প্রবাহ পাঠিয়ে ইস্পাতের দণ্ডে অতি সহজেই মূল- এবং উপ- সুর জাগানো যায়। বিঘ্নিত-তড়িৎ-চুম্বক-লালিত সুরশলাকার স্পন্দনই (§১৫-৩) তার উদাহরণ। স্পন্দনী ভাল্ভ-বর্তনীর সাহায্যে যেকোন উচ্চ কম্পাংকেরই

স্পন্দন-উদ্দীপন সম্ভব। চৌকো প্রস্থচ্ছেদের বারের ওপর মিহি বালি সুষম-ভাবে ছড়িয়ে অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের মতোই (§ ১৩-৫ক) এখানেও মোটামুটিভাবে নিস্পন্দরেখার অবস্থান-নির্দেশ এবং কম্পনের সূত্রগুলি প্রতিষ্ঠা করা যায়।

ক্যালিডোফোন (চিত্র 10.16) আসলে একটি বদ্ধ-মুক্ত দণ্ড মাত্র; একযোগে সমকোণে প্রযুক্ত দুই রৈখিক স্পন্দনে তার মুক্ত প্রান্তের স্পন্দন উৎপন্ন হয়। স্পন্দনশীল মুক্তপ্রান্ত, একাধিক স্পন্দনের সংশ্লেষে উৎপন্ন সরণরেখা বর্ণনা করে। তাই সেই প্রান্ত থেকে প্রতিফলিত আলোকরশ্মি দিয়ে যেকোন জটিল অনুপ্রস্থ স্পন্দন বিশদভাবে নিরীক্ষণ করা সম্ভব; এইজাতীয় গতি—আবর্ত ও অরীয় স্পন্দনের সংশ্লেষজাত ব'লে মনে করা যায়।

বদ্ধ-মুক্ত একসারি পত্রীর অনুপ্রস্থ স্পন্দনকে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার **কম্পাংক-মাপী** হিসাবে ব্যবহার করা যায়। যন্ত্রটিতে ক্রমদীর্ঘায়মান পত্রীসারি একই তড়িৎ-চুম্বকের ক্রিয়াধীন। দৈর্ঘ্য যত বাড়ে কম্পাংক ততই কমে এবং প্রতিটি পত্রীর মূলকম্পাংক তার গায়ে লেখা থাকে। চুম্বক-কুণ্ডলীতে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা পাঠালে যথাযোগ্য কম্পাংকের পত্রীটি অনুনাদী কম্পাংকে জোরে কাঁপতে সুরু করে। তার কম্পাংকই বিদ্যুৎ-ধারার কম্পাংক।

১৩-৯. দণ্ডে ব্যাবর্তন তরঙ্গ :

রড বা নলে রজন-মাখানো চামড়ার টুকরো জড়িয়ে ধরে মোচড় দিলে বা বারের দুই প্রান্তের কাছাকাছি উল্টোমুখে ছড় টানলে, কিম্বা যেকোন প্রান্তে দ্রুতবেগে ঘূরন্ত কর্কশ চাকা লাগিয়ে রাখলে, সেই সেই জায়গায় প্রস্থচ্ছেদের আপন তলেই ব্যাবর্ত দোলন হতে থাকে। এই দোলন পরবর্তী প্রস্থচ্ছেদ সাপেক্ষে দণ্ডে কৃন্তনের সৃষ্টি করবে এবং উৎপন্ন ব্যাবর্ত বা কৃন্তন তরঙ্গ, দণ্ড বরাবর এগিয়ে গিয়ে প্রান্তীয় প্রতিফলনের ফলে স্থাণুতরঙ্গ ঘটাবে। স্বভাবতই খুব যত্ন না নিলে দণ্ডে একই সঙ্গে অনুদৈর্ঘ্য এবং অনুপ্রস্থ স্পন্দনও হবে।

এখানে প্রযোজ্য স্থিতিস্থাপক গুণাংক হচ্ছে কৃন্তন-গুণাংক (G); ধরা যাক, এখানে দণ্ডটি x-অক্ষ বরাবর রাখা একটি রড বা নল এবং x বাড়ার সঙ্গে ব্যাবর্তন বা মোচড়-দ্বন্দ্ব (torsional couple) বাড়ছে। তাহলে δx বেধের একটি চাকতির দুই প্রান্তে

$$C(\partial\theta/\partial x) \text{ এবং } C[\partial\theta/\partial x+(\partial/\partial x)(\partial\theta/\partial x)\,\delta x]$$

মানের দ্বন্দ্ব সক্রিয়—C এখানে ব্যাবর্তনীয় গুণাংক। রডের ব্যাস r হলে,

$C = \frac{1}{2}G\pi r^4$* হয়। তাহলে চাকতিটির ওপর গতিসঞ্চারী লব্ধি-দ্বন্দ্বের মান $-C.(\partial^2\theta/\partial x^2)\,\delta x$ এবং সেটা স্পষ্টতই আবর্তীয় জড়তা-দ্বন্দ্বের সমান হবে।

$$\therefore \quad -C\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = I\left(-\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2}\right) = m\kappa^2\left(-\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2}\right) \qquad (১৩\text{-}৯.১)$$

$$\therefore \quad \tfrac{1}{2}G\pi r^4.\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}\,\delta x = \pi r^2\delta x\rho.\tfrac{1}{2}r^2.\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} \; [\text{গোল পাতে } \kappa^2 = \tfrac{1}{2}r^2]$$

$$\therefore \quad \frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho}\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \quad \text{বা} \quad C = \sqrt{G/\rho} \qquad (১৩\text{-}৯.২)$$

এই বিশ্লেষণ ১৩-২ অনুচ্ছেদে দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের প্রসারেরই অনুরূপ ; সুতরাং মূল সুরের কম্পাংক $n_0 = (1/2l)(\sqrt{G/\rho})$ হবে এবং উচ্চতর কম্পাংকের স্পন্দনে সুস্পন্দ ও নিস্পন্দবিন্দুগুলির বিন্যাস অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের মতোই হবে। রডে দুই শ্রেণীর তরঙ্গবেগের অনুপাত $\sqrt{q/G}$—ইস্পাতের বেলায় সেই মান 1.58 হয়ে দাঁড়ায়।

৭-৬ অনুচ্ছেদে স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের আলোচনাপ্রসঙ্গে বিস্তৃত কঠিন মাধ্যমে কৃন্তন তরঙ্গের কথা এসেছে। কৃন্তন-বিকৃতি-জাত ব'লে তারাও $\sqrt{G/\rho}$ বেগে চলে।

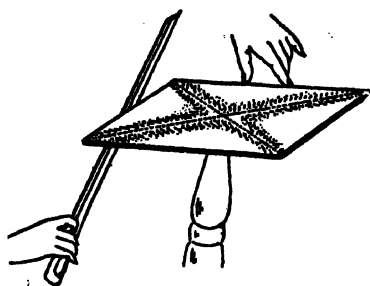
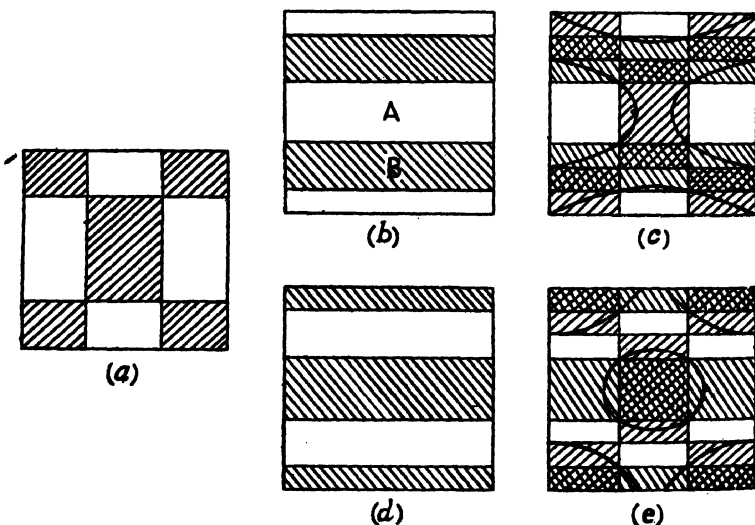
১৩-১০. পাতের স্পন্দন :

আগেই বলা হয়েছে যে, দণ্ডের প্রস্থ বা ব্যাস দৈর্ঘ্যসাপেক্ষে ছোট হলেও নগণ্য নয় ; তেমনই পাত এমন এক কঠিন ফলক, যার বেধ তার দৈর্ঘ্য-প্রস্থ-সাপেক্ষে ছোট হলেও নগণ্য নয়। দণ্ডের স্থাণুস্পন্দন যেমন একমাত্রিক, পাতে স্থাণু-স্পন্দনকে আমরা তেমন দ্বিমাত্রা ব'লে ধরতে পারি।

কার্বন মাইক্রোফোনে, স্বনোত্তর তরঙ্গের উৎস হিসাবে ব্যবহৃত কোয়ার্ৎজ্ পাতে, সমুদ্রগর্ভে স্বনকে এবং নানারকম ঘণ্টায় পাতের স্পন্দনের ব্যবহারিক প্রয়োগ রয়েছে। যথাযোগ্য জায়গায় যেসব আলোচনা হবে।

পাতে স্পন্দনের রেখাচিত্র (Chladni's Figures) : এইক্ষেত্রে নিরীক্ষণ-ব্যবস্থার পথিকৃৎ বিজ্ঞানী ক্ল্যাড্‌নি (১৭৮৭)। কাচ বা খুব মসৃণ পিতলের চৌকো পাতের ওপরে সুষমভাবে মিহি বালি ছড়িয়ে রেখে এবং এক

* 'পদার্থের ধর্ম' বইখানির 307 পৃষ্ঠায় 9-6.3 সমীকরণ এবং শেষ দুই লাইন দেখ।

কিনারার মাঝামাঝি জায়গায় লম্বদিকে মৃদু চাপে রজন-মাখানো বেহালার ছড় টেনে তিনি স্পন্দন উদ্দীপিত (চিত্র 13.10) করেন। ছবিতে দেখা যাচ্ছে যে, পাতের মধ্যবিন্দু দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ, কাজেই সেটি সর্বদাই নিস্পন্দ থাকবে। বিচলনবিন্দু থেকে সরণ-তরঙ্গ তল বরাবর চারিদিকে ছড়িয়ে পড়বে এবং ফলকের মাপ যথাযথ হলে স্থাণুতরঙ্গ প্রতিষ্ঠিত হবে ; তখন বালুকণাগুলি নিস্পন্দরেখাগুলি বরাবর জমা হয়ে স্থাণু-তরঙ্গের প্যাটার্ন বা রূপরেখা ফুটিয়ে তোলে এবং মূল সুর বাজতে থাকে। কোন উপসুর বাজাতে হলে পাতটিকে যথাযথ নিস্পন্দরেখার কোন বিন্দুতে হালকা ক'রে চেপে ধ'রে কোন সুস্পন্দরেখা যেখানে কিনারায় পৌঁছয় সেখানে লম্ব বরাবর ছড় টানতে হয়। এইরকম অনেকগুলি সুন্দর সুন্দর ক্ল্যাড্‌নির চৌকোনা নক্‌সা 13.11 চিত্রে দেখানো হয়েছে। নিস্পন্দরেখার

চিত্র 13.10—পাতে স্পন্দন-উদ্দীপন

চিত্র 13.11—ক্ল্যাড্‌নি-চিত্রাবলী

দু'ধারে পাতের স্পন্দন বিপরীত দশায় ঘটে—লিসাজু এক Y-আকৃতির ব্যতিচার নল বা স্টেথোস্কোপের সাহায্যে তা দেখিয়েছেন ; ছবিতে A এবং B

অগুলে দুই নলের মুখ বসালে, প্রায় পূর্ণ ব্যতিচারের ফলে নির্গম-নলের মুখে সামান্যই শব্দ শোনা যায়। পাত চৌকো না হয়ে গোলও হতে পারে; সেক্ষেত্রে উৎপন্ন ক্ল্যাড্‌নি-চিত্রগুলি 12.13 ছবিতে দেখানো হয়েছে।

পরবর্তী কালে এই পন্থা আরও সংস্কৃত ও মার্জিত হয়েছে। স্পন্দনশীল পাতে জমাট-বাঁধা CO_2-র গুঁড়ো ছড়িয়ে শ্রীমতী মেরী ওয়ালার সমস্ত ক্ল্যাড্‌নি রেখাচিত্র পুনরুৎপাদিত করেছেন। কল্‌ওয়েল ভাল্‌ভ্‌-নিয়ন্ত্রিত স্পন্দক-বর্তনী থেকে উচ্চকম্পাংকপাল্লায় (10-15 kHz) পাতলা পিতলের পাতে এবং স্বনোত্তর কম্পাংকে (50 kHz) কাচের পাতে স্পন্দন জাগিয়ে এই চিত্রাবলী পেয়েছেন। এ ছাড়া, হালের সহযোগিতায় তিনি কোয়াৎর্জের গোল পাতে বৈদ্যুত-বিকৃতি (electrostriction) ঘটিয়ে নমনজাত স্থাণুস্পন্দন উৎপন্ন ক'রে এবং শ্যানেম্যান্ গোল ধাতুপাতে চৌম্বকবিকৃত (magnetostriction) নলের সাহায্যে সমকম্পাংকে স্পন্দন জাগিয়ে অভিন্ন আকার ক্ল্যাড্‌নি-চিত্র পেয়েছেন। পরীক্ষায় এঁরা আরও দেখিয়েছেন যে—

(১) অনুনাদী স্পন্দনের বেলাতেই মাত্র, নিস্পন্দরেখা অতিক্রম করলেই দশাবৈপরীত্য ঘটে;

(২) সাধারণত কিন্তু নিস্পন্দরেখা পার হলেই দশাবৈপরীত্য ঘটে না;

(৩) তাত্ত্বিক সর্তাবলী ঠিক ঠিক মেনে নিয়ে পাতের স্পন্দন হলে, তা গাণিতীয় বিশ্লেষণ অনুযায়ীই হয়।

চারকোনা পাতে (চিত্র 13.11) উৎপন্ন রেখাগুলি দুইপ্রস্থ (two sets) স্থাণুতরঙ্গের উপরিপাতনের জন্যই হয়; প্রতিটি স্থাণুতরঙ্গশ্রেণীর নিস্পন্দ ও সুস্পন্দ রেখাগুলি এক এক জোড়া কিনারার সমান্তরালে হয়। ছবিতে তাই শেড-দেওয়া অংশগুলি অবনত এবং সাদা অংশগুলি উন্নত; তাই (a) এবং (b) ছবির রেখাগুলির উপরিপাতন ঘটালে (c) চিত্রটি আসবে এবং মোটা দাগগুলি নিস্পন্দরেখা নির্দেশ করবে। (a) আর (d)-র উপরিপাতনে, অনুরূপভাবে (e) চিত্রটি আসবে। উৎপন্ন সুরগুলির কম্পাংক, বেধের সমানুপাতিক এবং দৈর্ঘ্যের বর্গের বিষমানুপাতিক। এই চিত্রগুলি যথাযোগ্য কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী ধারা উদ্দীপিত বিদ্যুৎ-চুম্বকের সাহায্যে ইস্পাতের পাতে উৎপন্ন করা হয়েছে।

পাতে অনুপ্রস্থ স্পন্দনের গাণিতীয় বিশ্লেষণ খুবই জটিল। কিনারায় আবদ্ধ গোল পাতের মূল রীতিতে কম্পাংকের মান হয়ঃ

$$n_0 \simeq \tfrac{1}{2}\frac{t}{r^2}\sqrt{\frac{q}{\rho(1-\sigma^2)}} \qquad (১৩\text{-}১০.১)$$

এখানে পাতের ব্যাসার্ধ ও বেধ যথাক্রমে r এবং t, আর ρ, q এবং σ তার উপাদানের যথাক্রমে ঘনত্ব, ইয়ং গুণাংক এবং পোয়াসঁর অনুপাত। উপসুরগুলি সমমেল নয়। এক্ষেত্রে অনুপ্রস্থ সরণ (z) অল্প হলে স্পন্দন-সমীকরণ হবে

$$\nabla^4(z) + 12\,\frac{\rho(1-\sigma^2)}{qd^2}\cdot\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0 \qquad (১৩\text{-}১০.২)$$

এখানে ∇(nabla) ধ্রুবীয় তন্ত্রে ল্যাপ্‌লাসীয় সংকারক।

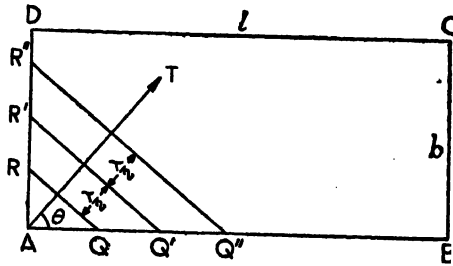
১৩-১১. স্থাণুতরঙ্গ এবং অনুনাদ:

তারে এবং দণ্ডে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি কি ক'রে হয় তা আমরা দেখলাম। পরের অধ্যায়ে আবার দেখব বায়ুস্তম্ভে এরা কি-ভাবে উৎপন্ন হয়। এদের প্রতিটি ক্ষেত্রেই স্থাণুতরঙ্গ একটি বিশেষ রেখা বরাবর থাকে, তাই তারা একমাত্রিক স্থাণুতরঙ্গ। ঝিল্লী, ছদ বা পাতে উৎপন্ন চল-তরঙ্গ তল বরাবর চলে, তাই তারা দ্বিমাত্রা। মাধ্যমের সীমাতলে এরা প্রতিফলিত হওয়াতেই দ্বিমাত্রা স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন হয়। তাই বিস্তৃত অথচ সীমিত মাধ্যমে—যেমন কোন ঘরে, বদ্ধ জলাশয়ে বা কঠিন চৌপলে ত্রিমাত্রিক স্থাণুতরঙ্গ হওয়ার কথা।

পূর্ববর্তী আলোচনাগুলি থেকে আমরা এ-সিদ্ধান্তও করতে পারি যে, কোন মাধ্যমে অনুনাদী স্পন্দনের কারণ, স্থাণুতরঙ্গ ; আর অনুনাদী কম্পাংক নিয়ন্ত্রিত হচ্ছে শব্দবাহী মাধ্যমের বিস্তৃতির এবং প্রান্তীয় প্রতিফলনে দশাবৈপরীত্য ঘটা বা না, ঘটার ওপর। অনুনাদ দুই শ্রেণীর—**অর্ধ দৈর্ঘ্য অনুনাদ** এবং **সিকি-বা পাদদৈর্ঘ্য অনুনাদ**।

প্রথম শ্রেণীর অনুনাদ ঘটে (১) মাধ্যমের রৈখিক মাপ অর্ধ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের যেকোন অখণ্ড গুণিতক এবং (২) তার উভয় সীমাতেই প্রতিফলনে অভিন্ন দশাভেদ ঘটলে ; যেমন দুই প্রান্তে আট্‌কানো স-টান তার, দু'দিকে আবদ্ধ বা মুক্ত দণ্ড, দুই মুখেই খোলা বা বন্ধ বায়ুস্তম্ভ। আর মাধ্যমের মাপ সিকি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের বিজোড় গুণিতক হ'লে এবং প্রান্তীয় দশাপরিবর্তন বিষমমুখী হলে, দ্বিতীয় শ্রেণীর অনুনাদ হয়—যেমন একদিকে আট্‌কানো দণ্ডে, এক-মুখ-খোলা বায়ুস্তম্ভে। প্রথম শ্রেণীতে সব সমমেলই উৎপন্ন হয়, দ্বিতীয় শ্রেণীতে কেবল বিজোড় সমমেল।

দ্বি- ও ত্রিমাত্রিক অনুনাদী তরঙ্গ : 13.12 চিত্রে $ABCD$ একটি ঝিল্লী, তার দৈর্ঘ্য l, প্রস্থ b; ধরা যাক, AT সরলরেখা বরাবর AB-র

চিত্র 13.12—দ্বিমাত্রিক অনুনাদী তরঙ্গ

সঙ্গে θ কোণে সমতলীয় তরঙ্গ এগোচ্ছে—তার দুই তরঙ্গমুখের অবস্থান RQ এবং $R'Q'$ পরস্পর $\lambda/2$ ব্যবধানে রয়েছে। AB এবং AD-র ওপর তাদের খণ্ডিতাংশ যথাক্রমে $\frac{1}{2}\lambda\cos\theta$ এবং $\frac{1}{2}\lambda\sin\theta$ হয়। যখনই $l=m_l\frac{1}{2}\lambda/\cos\theta$ এবং $b=m_b\frac{1}{2}\lambda/\sin\theta$ হবে (m অখণ্ড সংখ্যা) তখনই অনুনাদ হবে।

$$\therefore \quad \left(\frac{1}{2}\frac{m_l\lambda}{l}\right)^2+\left(\frac{1}{2}\frac{m_b\lambda}{b}\right)^2=\cos^2\theta+\sin^2\theta=1$$

$$\text{বা} \quad \left[\left(\frac{m_l}{l}\right)^2+\left(\frac{m_b}{b}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}=\frac{2}{\lambda} \qquad (১৩\text{-}১১.১)$$

কাজেই অনুনাদী কম্পাংকশ্রেণী হবে

$$n=\frac{c}{\lambda}=\frac{c}{2}\left[\left(\frac{m_l}{l}\right)^2+\left(\frac{m_b}{b}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (১৩\text{-}১১.২)$$

[১২-১৮.৭ সমীকরণের সঙ্গে তুলনা কর]

এই বিশ্লেষণ ত্রিমাত্রায় প্রসারিত করলে অর্থাৎ চৌপলের দৈর্ঘ্য, প্রস্থ, বেধ যথাক্রমে l, b, d হলে অনুনাদের সর্ত হবে

$$\left(\frac{m_l}{l}\right)^2+\left(\frac{m_b}{b}\right)^2+\left(\frac{m_d}{d}\right)^2=\frac{4}{\lambda^2} \qquad (১৩\text{-}১১.৩)$$

এবং অনুনাদী কম্পাংকশ্রেণীর মান দাঁড়াবে

$$n=\frac{c}{2}\left[\left(\frac{m_l}{l}\right)^2+\left(\frac{m_b}{b}\right)+\left(\frac{m_d}{d}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (১৩\text{-}১১.৪)$$

র‍্যালে-জীন্‌স্‌ এবং প্ল্যাংকের বিকিরণ (Radiation) সূত্রাবলী এবং ডিবাই-কৃত কঠিনের স্থির-আয়তন আপেক্ষিক তাপ-সূত্রের ব্যুৎপত্তিতে শেষ দুই সমীকরণের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা রয়েছে।

প্রশ্নমালা

১। দণ্ডে শব্দতরঙ্গের বেগের ব্যঞ্জকরাশি প্রতিষ্ঠা কর এবং তরঙ্গ-সমীকরণের সাধারণ সমাধান চলক-বিশ্লেষণ পদ্ধতিতে নির্ণয় কর।

২। এই সাধারণ সমাধান থেকে মুক্ত-মুক্ত এবং মুক্ত-বদ্ধ বার-এর বিশিষ্ট কম্পাংকগুলি বার কর। স্থাণুতরঙ্গ-পন্থায়ও এই কম্পাংকগুলি নির্ণয় কর।

৩। রডে নমনজনিত তরঙ্গের সমীকরণ প্রতিষ্ঠা কর এবং তার বেগের মান নির্ণয় কর।

রডের নমনজনিত স্পন্দনের সঙ্গে সুরশলাকার স্পন্দনের সম্পর্ক মোটামুটিভাবে বর্ণনা কর। সুরশলাকার কি গুণ থাকায় শব্দবিচারে তার এত গুরুত্ব?

৪। রড্‌ এবং অসীম কঠিনে কি কি ধরণের স্থিতিস্থাপক তরঙ্গের উৎপত্তি সম্ভব? তাদের প্রাসঙ্গিক স্থিতিস্থাপক গুণাংক কি কি?

৫। একটি বার-কে ধীরে ধীরে বেঁকিয়ে U-আকৃতিতে আনা হ'ল। তার সরণ-নিস্পন্দবিন্দুগুলির অবস্থানের কিরকম পরিবর্তন হবে?

৬। ক্ল্যাড্‌নি-চিত্র বলতে কি বোঝ? বৃত্তাকার এবং চতুষ্কোণ পাত কেন্দ্রে আবদ্ধ থাকলে স্পন্দনরীতি কি কি রকম হবে?

৭। ৩ মি লম্বা পিতলের ($\rho = 8.3$ গ্রাম/ঘন সেমি) রড্‌ মধ্যবিন্দুতে আট্‌কানো হলে, তার অনুদৈর্ঘ্য কম্পাংক 600/সে হয়। পিতলের ইয়ং-গুণাংক কত? (10.76×10^{11} একক)

৮। রডে অনুদৈর্ঘ্য ও অনুপ্রস্থ স্পন্দনের নিরীক্ষণের পন্থাগুলি লেখ।

৯। দণ্ডে ব্যাবর্তন-তরঙ্গের অবকল সমীকরণ ও গতিবেগ বার কর।

১৪

বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন

(Vibration of Air Columns)

১৪-১. সূচনা :

আগের দুই অধ্যায়ে আমরা কঠিন মাধ্যমের নানা স্পন্দনরীতি আলোচনা করেছি ; তাতে দেখা গেল যে, তারের কম্পন অনুপ্রস্থ আর দণ্ডের অনুপ্রস্থ, অনুদৈর্ঘ্য, ব্যাবর্ত তিন রকমেরই হয় ; এরা একমাত্রিক স্পন্দক ; কিন্তু দ্বিমাত্রিক ও ত্রিমাত্রিক স্পন্দক, ঝিল্লী ছদ ও পাতের স্পন্দন কেবলমাত্র অনুপ্রস্থ। এবারে আমাদের আলোচ্য বিষয়—বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন ; এই স্পন্দন কেবল অনুদৈর্ঘ্যই, কেননা বায়ু প্রবাহী মাধ্যম—তার কৃন্তন-বিকৃতি হয় না, তাই অন্য কোন-জাতীয় স্পন্দন হতে পারে না।

বায়ুস্তম্ভ বলতে আমরা মোটামুটি চওড়া, বেলনাকার, শংকু-আকার বা সূচক (exponential) আকারের নলে সীমিত বায়ু-মাধ্যম বুঝব। নলের দুই মুখই খোলা, কিম্বা এক মুখ খোলা অপর মুখ বন্ধ থাকতে পারে। দুই প্রান্তে মুক্ত দণ্ডের মতোই, দুই-মুখ-বন্ধ নলে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনের কোন ব্যবহারিক প্রয়োগ নেই। বাঁশী, ক্ল্যারিনেট, শাঁখ, শিঙা, তুরী, অর্গ্যান প্রভৃতি অসংখ্য বাতবাদ্যযন্ত্রে বায়ুস্তম্ভের কম্পনই সুরের জনক। নলের খোলা মুখে টানা ফুঁ দিয়ে বায়ুস্তম্ভে সংকোচন ও প্রসারণ ঘটানো হয়। উৎপন্ন চাপ-তরঙ্গ নল বরাবর গিয়ে, অপরপ্রান্তে প্রতিফলিত হয়ে ফিরে আসে। আপতিত এবং প্রতিফলিত তরঙ্গের উপরিপাতনে স্থাণুতরঙ্গ হয়। প্রান্তিক সর্তানুমোদিত কয়েকটি মাত্র কম্পাংকের স্পন্দনই স্থায়ী হয় ; সেই কম্পাংকগুলি নলের দৈর্ঘ্য এবং নল-মাধ্যমে চাপ-তরঙ্গের বেগের ওপর নির্ভর করে।

বায়ুস্তম্ভের খোলা মুখ থেকে প্রতিফলনের ফলে প্রতিবারেই কিছুটা ক'রে শক্তি গোলীয় তরঙ্গের আকারে (চিত্র 17.30) বাইরে ছড়িয়ে পড়ে ; তাই বায়ুস্তম্ভ স্বনকের কাজ করে। আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গের চাপ-বিস্তার আলাদা আলাদা হওয়ায় সরণ-নিস্পন্দবিন্দুতে স্বল্পকণা-বিচলন থাকে।

১৪-২. বেলনে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন :

সরল নল দু'রকমের—**খোলা** অর্থাৎ দু'মুখ-খোলা এবং **বন্ধ** অর্থাৎ

এক-মুখ-বন্ধ। এদের মধ্যে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনের গণিতীয় বিশ্লেষণে সরলীকরণের খাতিরে ধ'রে নেওয়া হবে—

(১) নলের দৈর্ঘ্য এবং তার মধ্যে সংকোচন-তরঙ্গের দৈর্ঘ্য, নলের ব্যাসের তুলনায় অনেক বড় ;

(২) নলের ব্যাসও আবার এত বড়, যাতে তাপীয় পরিবহণ এবং সান্দ্রতার দরুন শক্তির অপচয় নগণ্য ;

(৩) নলের দেওয়ালের উপাদান অনমনীয় ; এবং

(৪) তরঙ্গ স্বল্পবিস্তার, সুতরাং বেগ এবং চাপের পরিবর্তনের বর্গ উপেক্ষণীয়।

এইসব সর্তাধীনে স্পন্দন আবর্তগতিরহিত এবং এত দ্রুত হয় যে, বায়ুর আয়তন-পরিবর্তন রুদ্ধতাপ ঘটনা।

তাহলে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন কোন দণ্ডের কণাসমূহের অনুদৈর্ঘ্য কম্পনের সঙ্গে অভিন্ন এবং এই স্পন্দন সরল দোলন ব'লে একই অবকল সমীকরণ এবং সমাধান প্রযোজ্য। সুতরাং ত্বরণ ও সরণ যথাক্রমে

$\ddot{\xi} = c^2(\partial^2\xi/\partial x^2)$ এবং

$$\xi = (A \cos \omega x/c + B \sin \omega x/c) \cos (\omega t + \varepsilon) \quad (১৪\text{-}২.১)$$

তাহলে কোন কণার নিমেষ-বেগ হবে ঃ

$$\dot{\xi} = -\omega \sin (\omega t + \varepsilon)(A \cos \omega x/c + B \sin \omega x/c) \quad (১৪\text{-}২.২)$$

এবং কোন ক্ষুদ্রাংশের সংকোচন—

$$-\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) = \frac{\omega}{c}\left(A \sin \frac{\omega x}{c} - B \cos \frac{\omega x}{c}\right) \cos (\omega t + \varepsilon) \quad (১৪\text{-}২.৩)$$

ক. **খোলা নল ঃ** চাপ-তরঙ্গের ক্রিয়ায় নলের দুই প্রান্তেই বায়ুকণাগুলির সরে যাওয়ার জায়গা তথা স্বাধীনতা থাকায়, সেখানে সেখানে চাপ-নিস্পন্দ (স্বাভাবিক চাপ) এবং সরণ-সুস্পন্দবিন্দু হবে। তাহলে প্রান্তিক সর্ত হবে ঃ

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{x=l} = 0$$

তাহলে ১৪-২.৩ সমীকরণ থেকে পাব প্রথমে

$$(\omega/c).B\cos(\omega t+\varepsilon)=0 \text{ বা } B=0$$

কেননা ω, c এবং $t\neq 0$; এই মান বসিয়ে দ্বিতীয় প্রান্তিক সর্ত থেকে পাব

$$\frac{\omega}{c}A\sin\frac{\omega l}{c}\cos(\omega t+\varepsilon)=0 \qquad (১৪\text{-}২.৪)$$

এখন $A\neq 0$ (কেননা, তা না হলে ১৪-২.৩ সমীকরণে দেশ-অংশ থাকবে না) ; শেষ সমীকরণ সিদ্ধ হতে পারে কেবল যখন

$\sin(\omega l/c)=0$ অর্থাৎ $\omega l/c=m\pi$, অর্থাৎ সম্ভাব্য কম্পাংক-শ্রেণী

$$n_m=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{m\pi c}{2\pi l}=\frac{1}{2}\frac{mc}{l} \qquad (১৪\text{-}২.৫)$$

তাহলে খোলা নলে, মূল কম্পাংক $\frac{1}{2}(c/l)$ এবং m অখণ্ড সাংখ্যমান হওয়ায় সব সমমেলই সম্ভবপর। দুই প্রান্তে মুক্ত দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনরীতির (১৩-৩.৫) সঙ্গে এক্ষেত্রে সাদৃশ্য লক্ষ্যণীয়। এই অনুনাদ ১৩-১১ অনুচ্ছেদে আলোচিত অর্ধ-দৈর্ঘ্য অনুনাদের এক বিশিষ্ট উদাহরণ।

খ. বন্ধ নল ঃ এখানে $x=0$ বিন্দুতে নলের মুখ খোলা, আর $x=l$ বিন্দুতে বন্ধ ধরলে, প্রান্তিক সর্ত হবে—

(১) খোলা মুখে সংকোচন হতে পারে না ব'লে $(\partial\xi/\partial x)_{x=0}=0$; সুতরাং আগের মতোই $B=0$ হচ্ছে।

(২) বন্ধ মুখে কণাদের সরণ নেই, সুতরাং তারা বেগহীন ; তাহলে

$$(\dot{\xi})_{x=l}=0$$

তাই ১৪-২.২ থেকে $\quad -\omega\sin(\omega t+\varepsilon)A\cos\omega l/c=0$

যেহেতু ω এবং ε ধ্রুবরাশি, $t\neq 0$ এবং আগের মতোই $A\neq 0$, আমরা পাব

$$\cos(\omega l/c)=0 \quad \text{বা} \quad \omega l/c=(2m+1)\pi/2$$

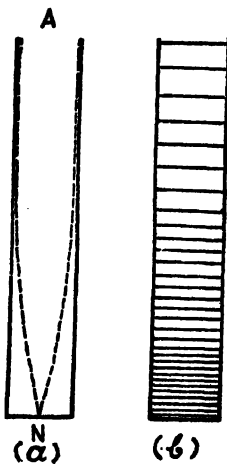
এবং
$$n_m=(2m+1)\,c/4l \qquad (১৪\text{-}২.৬)$$

অতএব মূল-সুরের কম্পাংক $c/4l$ এবং কেবল অযুগ্ম সমমেলগুলিই সম্ভবপর। আগের অধ্যায়ের মুক্তবদ্ধ দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের সঙ্গে সাদৃশ্য লক্ষ্য কর। ১৩-১১ অনুচ্ছেদে আলোচিত সিকি-দৈর্ঘ্য অনুনাদের, এটি এক বিশেষ উদাহরণ।

১৪-৩. স্পন্দনশীল বায়ুস্তম্ভ ও স্থাণুতরঙ্গ :

স-টান তারে অনুপ্রস্থ এবং দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনকে যেমন স্থাণুতরঙ্গ ব'লে বিবেচনা করা হয়েছে, বায়ুস্তম্ভে স্থায়ী স্পন্দনকে তেমনই স্থাণুতরঙ্গ ব'লেই ধরা চলে। নলের মধ্যে দিয়ে সংকোচন তরঙ্গ এগিয়ে অপরপ্রান্তে প্রতিফলিত হয়ে ফিরে আসে। এই দুই বিষমমুখী সচল তরঙ্গের উপরিপাতনের ফল হচ্ছে স্থাণুতরঙ্গ।

ক. বদ্ধ নল : নলের বদ্ধ প্রান্তে প্রতিফলন বস্তুত দৃঢ় সীমানায় সচল সমতলীয় তরঙ্গের প্রতিফলনের উদাহরণ—তিনটি সর্ত এখানে পালিত —(ক) দুই তরঙ্গে কণাসরণ বিপরীতমুখী (খ) সংকোচন তাই অপরিবর্তিত দশায় প্রতিফলিত (গ) আপতিত শক্তির প্রায় সবটাই ফিরে আসে।

ধরা যাক, সচল সমতলীয় তরঙ্গ নলের খোলা মুখ ($x=0$) থেকে নলের অক্ষ বরাবর গিয়ে বদ্ধ মুখে ($x=+l$) প্রতিফলিত হয়ে $-x$ দিকে ফিরে আসছে। বিষমমুখী আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গমালা মিলে স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন করবে। বদ্ধপ্রান্তে বায়ুস্তর অনড়, কেননা সেখানে বায়ুকণাদের নড়ার জায়গা নেই ; কাজেই সেখানে সরণনিস্পন্দবিন্দু এবং চরমচাপাধিক্য বা চাপসুস্পন্দবিন্দু (চিত্র 14.1b)। আর সেখান থেকে যতই খোলা মুখের দিকে যাওয়া যাবে ততই কণাদের সরণের পরিমাণ বাড়তে থাকবে (চিত্র 14.1a) ; মুক্ত প্রান্তে সরণ চরমমাত্রা—সেখানে সরণসুস্পন্দবিন্দু। যেহেতু চাপ বাড়লেই এখানে বায়ুস্তরের সরে যাওয়ার জায়গা রয়েছে, তাই এখানে চাপনিস্পন্দবিন্দু অর্থাৎ চাপ স্বাভাবিক। দুই মুখের এই প্রান্তিক সর্ত পূর্ণ ক'রে আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গের গণিতীয় প্রতিরূপ হবে যথাক্রমে

চিত্র 14.1
বদ্ধ নলে মূল রীতিতে বায়ুস্পন্দন

$$\xi_1 = a \sin \beta (ct - x + l) \text{ এবং}$$

$$\xi_2 = a \sin \beta (ct + x - l) \qquad (১৪-৩.১)$$

তাহলে কোন একটি বিন্দুতে লব্ধি-সরণ হবে

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2a \sin \beta (x - l) \cos \beta ct \qquad (১৪-৩.২)$$

সমীকরণের দশা-অংশে দেশ-নির্দেশক রাশি x না থাকায়, এটি স্থাণুতরঙ্গ সূচিত

করছে। আবার দুই তরঙ্গের মিলিত ক্রিয়ায় কোন কণার বেগ এবং সংকোচন যথাক্রমে দাঁড়াবে

$$\dot{\xi} = -2a\beta c \sin \beta (x-l) \sin \beta ct \qquad (১৪\text{-}৩.৩)$$

$$-\frac{\partial \xi}{\partial x} = -2a\beta \cos \beta (x-l) \cos \beta ct \qquad (১৪\text{-}৩.৪)$$

এখন সরণ শূন্য হতে হলে ১৪-৩.২ থেকে পাচ্ছি ($\because \ t \neq 0$)

$$2a \sin \beta (x-l) = 0 \quad \text{অর্থাৎ} \quad \sin \beta (x-l) = 0$$

বা $\beta (x-l) = m\pi$ অর্থাৎ $x - l = m\pi/\beta = \frac{1}{2}m\lambda$ (১৪-৩.৫)
আবার বেগ শূন্য হতে হলে ১৪-৩.৩ সমীকরণের ডান দিকে শূন্য বসালে এই ফলেই পৌঁছব। কিন্তু x-এর চরম মান l ; তাই $(x-l)$ ঋণাত্মক রাশি। অতএব

$$x = l - \tfrac{1}{2}m\lambda \qquad (১৪\text{-}৩.৬)$$

এখন $m = 0, 1, 2, 3, \cdots$ ইত্যাদি হলে $x_0 = l$, $x_1 = l - \frac{1}{2}\lambda$, $x_2 = l - \lambda$, $x_3 = l - \frac{3}{2}\lambda, \cdots$ চিহ্নিত বিন্দুগুলি সরণ ও বেগের নিস্পন্দ অবস্থানগুলি নির্দিষ্ট করবে। আবার এদের দুই ক্রমিক অবস্থানগুলি যে $\frac{1}{2}\lambda$ তফাতে থাকছে তা সহজেই বোঝা যায়।

এবার শাব্দচাপ p এবং মাধ্যমের বিকারাংক K ধরলে, হুক-এর সূত্রানুসারে

$$p = -K\frac{\partial \xi}{\partial x} = -2\beta\, a \cos \beta (x-l) \cos \beta\, ct$$

স্বভাবতই p-র চরম মান হতে হলে

$$\cos \beta(x-l) = \pm 1 \quad \text{বা} \quad \beta(x-l) = m\pi$$

$$\text{বা} \quad x = l - \tfrac{1}{2}m\lambda \qquad (১৪\text{-}৩.৭)$$

লক্ষণীয় যে এটি আগের সমীকরণের সঙ্গে অভিন্ন ; চরম চাপভেদ এবং শূন্য সরণ একই বিন্দুতে হ'ল। আবার $p = 0$ হতে হলে

$$\cos \beta(x-l) = 0 \quad \text{বা} \quad \beta(x-l) = (2m+1)\tfrac{1}{2}\pi$$

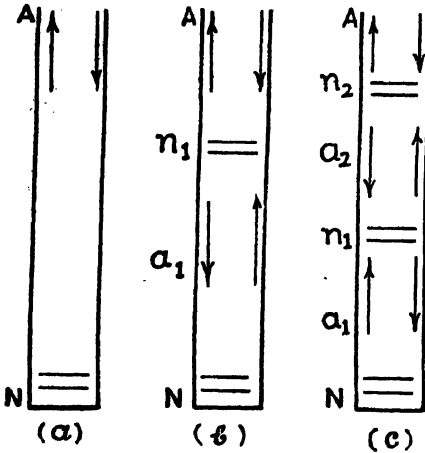
$$\text{বা} \quad x - l = (2m+1)\tfrac{1}{4}\lambda \qquad (১৪\text{-}৩.৮ক)$$

কিন্তু ১৪-৩.২ বা ১৪-৩.৩ থেকে সরণ বা বেগের চরম মান হওয়ার সর্ত হচ্ছে

$$\sin \beta(x-l) = \pm 1 \text{ বা } \beta(x-l) = (2m+1).\tfrac{1}{2}\lambda$$

$$\text{বা } \quad x = l-(2m+1).\tfrac{1}{4}\lambda \qquad (১৪-৩.৮খ)$$

কাজেই $x_0 = l-\frac{1}{4}\lambda$, $x_1 = l-\frac{3}{4}\lambda$, $x_2 = l-\frac{5}{4}\lambda, \cdots$ ইত্যাদি অবস্থানে সরণ বা বেগসুস্পন্দ- এবং চাপনিস্পন্দ-বিন্দু থাকবে। তাদের ক্রমিক অবস্থানের মধ্যে অন্তর $\frac{1}{2}\lambda$।

$m=0$ বসালে, ১৪-৩.৮খ অনুযায়ী খোলা মুখে ($x=0$) সরণ চরম এবং ১৪-৩.৬ অনুযায়ী বন্ধ মুখে ($x=l$) সরণ শূন্য। তখন কম্পাংক নিম্নতম এবং স্পন্দন মূল রীতিতে (চিত্র 14.1*a* এবং 14.2*a*) হয়। $m=1, 2, \cdots$ ইত্যাদি হলে, দুই প্রান্তের মধ্যে একজোড়া, দু'জোড়া, ··· সুস্পন্দ- ও নিস্পন্দ- বিন্দু (চিত্র 14.2*b*, 14.2*c*) দেখা দেবে এবং প্রথম, দ্বিতীয় ইত্যাদি সমমেল উৎপন্ন হবে। প্রতিফলন পূর্ণ না হলে সব শক্তিটা ফিরে আসে না এবং সরণনিস্পন্দ-বিন্দুতে অল্পস্বল্প সরণ থাকেই।

চিত্র 14.2—বন্ধ নলে বায়ুস্পন্দনে সমমেলশ্রেণী

খ. খোলা নল: এখানে দুই বায়ুমাধ্যমের সীমানায় অর্থাৎ নমনীয় প্রতিবন্ধকে প্রতিফলন ঘটে। সমতলীয় সংকোচন-তরঙ্গ নলের $x=l$ বিন্দুতে অর্থাৎ অপর খোলা মুখে পৌঁছে, বাইরে অর্ধগোলকের আকারে (চিত্র 17.30) ছড়িয়ে পড়ে। সেখানে তরঙ্গের ঘনীভূত স্তরের চাপে চারিপাশের বায়ু সরে গিয়ে আংশিক শূন্যতার সৃষ্টি করবে। এইভাবে সৃষ্ট তনুভবন উল্টোমুখে নলের ভেতর পেছোতে থাকবে; অর্থাৎ, যমজ সংকোচন-তরঙ্গের ঘনীভবন নলের বাইরে $+x$ মুখে আর তনুভবন নলের ভেতর $-x$ মুখে চলবে। এই প্রতিফলনের ফলে $x=l$ বিন্দুতে (১) দুই তরঙ্গের কণাসরণ সমমুখী হবে; (২) তাদের সংকোচন অবস্থার দশাবৈপরীত্য (§৯-৪) ঘটবে; এবং (৩) আপতিত শক্তির $p(=1-\beta^2r^2)$ অংশ ($r=$ নলের ব্যাসার্ধ)

প্রতিফলিত হবে। তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) নলের ব্যাসের ($2r$) তুলনায় ($\beta=2\pi/\lambda$) যত বড় হবে ততই বেশী পরিমাণে শক্তি প্রতিফলিত হবে।

এইজাতীয় নলের দুই প্রান্তেই সরণ অবাধে হতে পারে ব'লে, সেখানে সেখানে সরণ এবং বেগ চরমমাত্রা এবং শাব্দচাপ অবমমাত্রা (14.3 চিত্র) হতে পারে। এইরকম প্রান্তিক সর্তশাসিত দুই তরঙ্গের সমীকরণ হবে

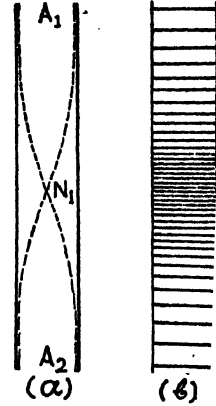
$$\xi_1=a\cos\beta(ct-x+l)$$

এবং $\xi_2=pa\cos\beta(ct+x-l)$

$$\therefore\quad \xi=\xi_1+\xi_2$$

$$=a(1+p)\cos\beta(x-l)\cos\beta ct.$$

$$a(1-p)\sin\beta(x-l)\sin\beta ct$$

(১৪-৩.৯)

চিত্র 14.3—খোলা নলে বায়ুস্পন্দনের মূলরীতি

এই সমীকরণ ৫-১৪খ অনুচ্ছেদে আলোচিত দু'প্রস্থ স্থাণুতরঙ্গের উপস্থিতি নির্দেশ করে—এদের কম্পাংক ($n=c/\lambda$) সমান, দশাভেদ $\frac{1}{2}\pi$ এবং সরণ-বিস্তার x-এর অপেক্ষক—কমে-বাড়ে কিন্তু কোথাও শূন্য হয় না।

প্রথম প্রস্থ স্থাণুতরঙ্গের যেখানে যেখানে $\cos\beta(x-l)=\pm 1$, সেখানে সেখানে সরণ চরমমাত্রা ; আবার ঠিক সেই-সেইখানে দ্বিতীয় প্রস্থ স্থাণুতরঙ্গের $\sin\beta(x-l)=0$, অর্থাৎ সরণ শূন্য। সুতরাং এই বিন্দুগুলিতে মোট সরণ $(1+p)$ হবে। আবার দ্বিতীয় প্রস্থের চরম সরণ অবস্থানগুলিতে বিস্তার $(1-p)$, কারণ সেখানে সেখানে প্রথম প্রস্থের দরুন সরণমান শূন্য। কাজেই দুই স্থাণুতরঙ্গের উপরিপাতনে সরণের মান $(1+p)$ থেকে $(1-p)$ এর মধ্যেই থাকে, কোথাও শূন্য হয় না।

নলের ব্যাসের তুলনায় তরঙ্গদৈর্ঘ্য বেশ বড় হলে, β^2r^2 $(=4\pi^2r^2/\lambda^2)$ রাশিটি প্রায় নগণ্য হয়ে যায় এবং আপতিত তরঙ্গশক্তির কার্যত প্রায় সবটাই প্রতিফলিত হয়। সেক্ষেত্রে আগের মতোই

কণাসরণ $\quad \xi=\xi_1+\xi_2=2a\cos\beta\,(x-l)\cos\beta ct$

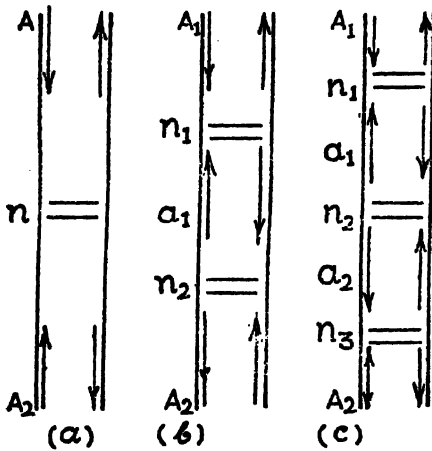
কণাবেগ $\quad \dot{\xi}=-2a\beta c\cos\beta\,(x-l)\sin\beta ct$

এবং সংকোচন $\quad -(\partial\xi/\partial x)=-2a\beta\sin\beta\,(x-l)\cos\beta ct$

হবে। তখন সরণ বা বেগ-নিস্পন্দবিন্দুর উৎপত্তির সর্ত হবে

$$\cos\beta(x-l)=0 \quad \text{বা} \quad x-l=(2m+1)\tfrac{1}{4}\lambda$$

$$\text{বা} \quad x=l-(2m+1)\tfrac{1}{4}\lambda \quad (১৪\text{-}৩.১০)$$

(১৪-৩.১০-এর সঙ্গে ১৪-৩.৮খ তুলনীয়। এরা দুই শ্রেণীর নলে যথাক্রমে সরণ বা বেগ-সুস্পন্দবিন্দু এবং নিস্পন্দবিন্দুর অবস্থানগুলি সূচিত করছে।) সুতরাং $x_0=l$, $x_1=l-\frac{1}{4}\lambda$, $x_2=l-\frac{2}{4}\lambda$, ··· প্রভৃতি অবস্থানে নিস্পন্দবিন্দুগুলি হবে এবং তাদের মধ্যেও $\frac{1}{4}\lambda$ ব্যবধান থাকবে। আবার, এদের সুস্পন্দবিন্দুগুলির অবস্থান $\cos\beta(x-l)=\pm 1$ মান দিয়ে নিয়ন্ত্রিত হবে এবং তারাও $\frac{1}{4}\lambda$ তফাতে তফাতে পড়বে। 14.4 চিত্রে ভিন্ন ভিন্ন স্পন্দনরীতিতে এদের দেখানো হয়েছে।

চিত্র 14.4
খোলা নলে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনরীতি

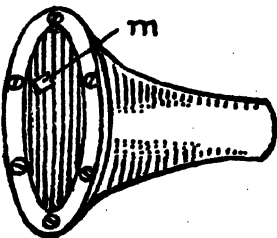
১৪-৪. বায়ুস্তম্ভে সুস্পন্দ ও নিস্পন্দ বিন্দুদের অবস্থান নির্ণয়:

নানা পরীক্ষায় স্পন্দনশীল বায়ুস্তম্ভে উৎপন্ন সরণ- বা বেগ- বা চাপ-সুস্পন্দবিন্দুগুলির অবস্থান নিরীক্ষণ ক'রে তাত্ত্বিক সিদ্ধান্তগুলি পর্যালোচনা করা যেতে পারে। প্রত্যেকের জন্যে একটি ক'রে সহজ পন্থা নির্দেশ করা হচ্ছে—

ক. সরণ-সুস্পন্দবিন্দু: একটা দীর্ঘ ও চওড়া অর্গান-নল এখানে প্রধান যন্ত্র; তার A মুখ দিয়ে বায়ুস্রোত ঢুকিয়ে (চিত্র 14.5) এবং মাথার D চাকৃতিটি ওঠা-নামা করিয়ে অনুনাদ প্রতিষ্ঠা করা হয়। নলের সামনের দিকটি কাচের, যাতে ভেতর পর্যন্ত দেখা যায়। লম্বা একটি সুতো (C) দিয়ে খুব পাতলা অথচ শক্ত কাগজের ছদ (B) ঝোলানো, তার ওপরে খুব মিহি, শুকনো বালি হালকাভাবে ছড়ানো থাকে। অনুনাদ হয়ে যখন জোরালো শব্দ হতে থাকে তখন সুতোয় আলগা দিয়ে আস্তে আস্তে B-কে নামাতে থাকলে সরণ- বা বেগ-সুস্পন্দবিন্দুতে বালুকণাগুলি জোরে লাফাতে এবং

খড়্‌খড়্‌ আওয়াজ করতে থাকে ; বিন্দুগুলি স্বাভাবিক চাপের অর্থাৎ চাপ-নিস্পন্দ-বিন্দুও বটে। B-কে নামাতে থাকলে শব্দ কমে যায় এবং পরবর্তী-চাপ-নিস্পন্দবিন্দুতে আবার আওয়াজ শোনা যায়। এই পরীক্ষায় তরঙ্গদৈর্ঘ্য সহজেই মাপা যায়। স্ট্যার্ট-উদ্‌ভাবিত এই পন্থাটি খুব সরল হলেও সঠিক নয়, কেননা ছদের উপস্থিতি বায়ুস্পন্দনে ব্যাঘাত ঘটিয়ে কণাসরণের মান কমিয়ে দেয়।

চিত্র 14.5
নলে সরণ-সুস্পন্দবিন্দু নিরীক্ষণ

(খ) বেগ-সুস্পন্দবিন্দু : এই ত্রুটি এড়াতে **রিচার্ডসন** সন্ধানী হিসাবে তপ্ত-তার ব্যবহার করেন। খুব সরু প্ল্যাটিনাম তারের মধ্যে বিদ্যুৎ-ধারা পাঠালে সে গরম হয়ে ওঠে ; তাকে বায়ুপ্রবাহের মধ্যে রাখলে (সে একমুখীই হোক বা প্রত্যাবর্তীই হোক) তারটি ঠাণ্ডা হয়ে যায়—এই উষ্ণতাহ্রাস বায়ুবেগের সমানুপাতিক। গরম তারের আর ঠাণ্ডা তারের রোধ আলাদা এবং হুইটস্টোন-এর প্রতিমিত বর্তনী ব্যবহার ক'রে তাদের প্রভেদ $(R_2 - R_1)$ বার করা সহজ। তাদের মান থেকে $R_2 = R_1 [1 + \alpha_R(t_2 - t_1)]$ সম্পর্ক প্রয়োগ ক'রে উষ্ণতাভেদ নির্ণয় করা হয়। নিনাদী নলের অক্ষ বরাবর খুব সরু তারের বিদ্যুৎ-তাপিত ছোট্ট একটি অংশ সরিয়ে সরিয়ে রিচার্ডসন ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে বৈদ্যুতিক রোধভেদ বার করেন ; বেগসুস্পন্দবিন্দুতে এই ভেদ সর্বাধিক। বলা বাহুল্য যে, ছোট্ট তারটি নলের মধ্যে বায়ুপ্রবাহে বিঘ্ন, নগণ্যই ঘটায়। এই পদ্ধতিটি **টাকার ও প্যারিস** উদ্ভাবিত তপ্ত-তার মাইক্রোফোনের একটি সুন্দর প্রয়োগ-বিশেষ।

(গ) চাপ-সুস্পন্দবিন্দু নির্ণয় : এই উদ্দেশ্যে রিচার্ডসন ছোট একটি কোষ (চিত্র 14.6) উদ্ভাবন করেন। এটি একটি ছোট্ট সূচক-জাতীয় শিঙা-বিশেষ—তার মুখ খুব পাতলা স-টান ঝিল্লী দিয়ে ঢাকা, ঝিল্লীর ওপর ছোট্ট একটি আয়না (m) লাগানো। শব্দতরঙ্গের আপতনে ঝিল্লীটি কাঁপে এবং আয়নাটির কৌণিক স্পন্দন হতে থাকে ; বাতি ও স্কেলের সাহায্যে এই স্পন্দন-বিস্তার মাপা যায়। আগেই ভিন্ন ভিন্ন জানা চাপবিস্তার প্রয়োগ ক'রে যন্ত্রের অংশাংকন-রেখা

চিত্র 14.6
চাপমান কোষ

বার করা থাকে। তারপর নিনাদী নলের অক্ষ বরাবর কোষটিকে সরিয়ে-সরিয়ে ভিন্ন ভিন্ন অবস্থানে m-এর কৌণিক বিচলনের পাঠ নেওয়া হয়; অংশাংকন-রেখা থেকে পাঠ-অনুযায়ী চাপবিস্তারের মান নির্ণয় করা যায়।

১৪-৫. বায়ুনলে শাব্দ বাধ :

কোন নলে ঢোকার পর বহিরাগত শব্দতরঙ্গ সমতলীয় হয়ে যেতে বাধ্য হয়, কেননা এখানে বায়ুকণার সরণের অবাধ স্বাধীনতা নেই। তরঙ্গব্যাপ্তিতে এই নিয়ন্ত্রণ আরোপিত হয় শাব্দ বাধের কারণে। তরঙ্গের প্রত্যাবর্তী চাপভেদ, সান্দ্রতা ও অন্যান্য কারণের দরুন শক্তিপ্রবাহে বাধা দেয়। বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের অনুকরণে শাব্দ বাধ ধারণাটি সন্নিবিষ্ট হয়েছে। ৮-৪ এবং ৮-৬ অনুচ্ছেদে বলা হয়েছে যে

$$\text{শাব্দ বাধ} = \frac{\text{কোন তলে আপতিত শাব্দচাপ}}{\text{ঐ তলভেদী আয়তন-বেগ}}$$

অর্থাৎ $$Z_a = p/Sv = p/U \qquad (১৪\text{-}৫.১)$$

এখানে p-আপতিত শাব্দ চাপ, S আপতন-তলের ক্ষেত্রফল, v শাব্দ তরঙ্গের ক্রিয়ায় কণাবেগ এবং U তলভেদী আয়তন-বেগ (৮-৪.২)। এই সমীকরণে p এবং v সমদশা হলে, শাব্দ বাধ (Z_a) বাস্তব রাশি, অন্যথায় সে জটিল রাশি।

এখন ১৪-২.২ অনুকরণে নলের প্রান্ত থেকে x দূরত্বে মাধ্যমের কণাবেগ ধরি

$$v = \dot{\xi} = [A \cos(\omega x/c) + B \sin(\omega x/c)]\, e^{j\omega t} \qquad (১৪\text{-}৫.২)$$

তাহলে কণাসরণ হবে

$$\xi = [A \cos(\omega x/c) + B \sin(\omega x/c)]\, e^{j\omega t}/j\omega \qquad (১৪\text{-}৫.৩)$$

আবার ৬-২.১ এবং ৬-৩.২ সমীকরণ থেকে শাব্দ চাপ

$$p = K\left(-\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) = -c^2 \rho_0 \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)$$

$$= +c^2 \rho_0 \left(A \sin\frac{\omega x}{c} - B \cos\frac{\omega x}{c}\right)\cdot\frac{\omega}{c}\cdot\frac{e^{j\omega t}}{j\omega}$$

$$= j\rho_0 c\, [B \cos(\omega x/c) - A \sin(\omega x/c)]\, e^{j\omega t} \qquad (১৪\text{-}৫.৪)$$

সুতরাং $$(Z_a)_x = p/Sv = p/S\dot{\xi}$$

$$= \frac{j\rho_0 c}{S}\left[\frac{B \cos(\omega x/c) - A \sin(\omega x/c)}{B \sin(\omega x/c) + A \cos(\omega x/c)}\right]$$

(১৪-৫.৫)

এবং $(Z_a)_{x=0} = \frac{j\rho_0 c}{S}\left[\frac{B}{A}\right] = Z_0$ (১৪-৫.৬)

$$\therefore \quad (Z_a)_x = \frac{j\rho_0 c}{S}\left[\frac{Z_0 \cos(\omega x/c) - (j\rho_0 c/S)\sin(\omega x/c)}{Z_0 \sin(\omega x/c) + (j\rho_0 c/S)\cos(\omega x/c)}\right]$$

$$= \frac{Z_0 - (j\rho_0 c/S)\tan(\omega x/c)}{(S/j\rho_0 c)\,Z_0 \tan(\omega x/c) + 1} \quad \text{(১৪-৫.৭)}$$

এখন $x = x$ বিন্দুতে যদি নলের মুখ বন্ধ থাকে, তাহলে সেই প্রান্ত দৃঢ়, অনমনীয়, সুতরাং $(Z_a)_x = \infty$ অর্থাৎ

$$\frac{S}{j\rho_0 c} Z_0 \tan\frac{\omega x}{c} + 1 = 0$$

অর্থাৎ $Z_0 = -\frac{j\rho_0 c}{S}\cot\frac{\omega x}{c}$ (১৪-৫.৮)

আর $x = 0$ বিন্দুতে এবং $x = l$ বিন্দুতে যদি দুই মুখই খোলা থাকে তাহলে $(Z_a).l = 0$;

তাহলে $Z_0 = \frac{j\rho_0 c}{S}\tan \omega x/c$ (১৪-৫.৯)

বিকল্প বিশ্লেষণ : এবারে আমরা আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গের উপরিপাতন বিবেচনা ক'রে ১৪-৫.৮ সমীকরণে পৌঁছব। ধরা যাক, নলের অক্ষ x-অক্ষ বরাবর রয়েছে আর তা-ই বরাবর সমতলীয় সংকোচন তরঙ্গ গিয়ে নলের অপরপ্রান্তে প্রতিফলিত হচ্ছে। তাহলে আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গে জটিল শাব্দচাপের মান যথাক্রমে হবে

$p_i = Ae^{j(\omega t - \beta x)}$ এবং $p_r = Be^{j(\omega t + \beta x)}$ (১৪-৫.১০)

আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গে p/U রাশিটির মান যথাক্রমে $\rho_0 c$ এবং $-\rho_0 c$ হবে ; কাজেই তাদের ক্ষেত্রে আয়তন-বেগও যথাক্রমে

$$U_i = \frac{p_i}{\rho_0 c/S} \text{ এবং } U_r = \frac{p_r}{-\rho_0 c/S}$$

হবে। নলের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে তরঙ্গদ্বয় ভিন্ন ভিন্ন দশায় উপরিপাতিত হবে, সুতরাং তাদের মধ্যে দশাসম্পর্ক এবং শাব্দবাধ আলাদা আলাদা হবে।

সুতরাং নলের কোন এক প্রান্তকে $x = 0$ ধ'রে, তার থেকে x দূরত্বে শাব্দবাধ (মান) আসবে

$$(Z_a)_{x=x}=\frac{p_i+p_r}{U_i+U_r}=\frac{\rho_0 c}{S}\frac{p_i+p_r}{p_i-p_r}$$

$$=\frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{Ae^{-j\beta x}+Be^{+j\beta x}}{Ae^{-j\beta x}-Be^{+j\beta x}} \qquad (১৪-৫.১১)$$

নলের প্রতিফলক প্রান্ত দৃঢ় হলে প্রতিফলন সম্পূর্ণ, অর্থাৎ $B=A$ হয়। তখন ১৪-৫.১১ সমীকরণ থেকে

$$(Z_a)_x=\frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{e^{+j\beta x}+e^{-j\beta x}}{-e^{+j\beta x}+e^{-j\beta x}}=\frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{2\cos\beta x}{-2j\sin\beta x}$$

$$=\frac{\rho_0 c}{S}(-j\cot\beta x) \qquad (১৪-৫.১২)$$

১৪-৫.৮ এবং ১৪-৫.১২ অভিন্ন ফল।

$$\therefore\quad (Z_a)_{x=0}=\frac{\rho_0 c}{S}\frac{A+B}{A-B}=\frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{1+B/A}{1-B/A}$$

এবং $$(Z_a)_{x=l}=\frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{Ae^{-j\beta l}+Be^{+j\beta l}}{Ae^{-j\beta l}-Be^{-j\beta l}} \qquad (১৪-৫.১৩)$$

তাহলে $$(Z_a)_0=\frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{1+B/A}{1-B/A}$$

অর্থাৎ $$\frac{B}{A}=\frac{(Z_a)_0-\rho_0 c/S}{(Z_a)_0+\rho_0 c/S} \qquad (১৪-৫.১৪)$$

১৪-৫.১০ থেকে দেখছি, A এবং B যথাক্রমে আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গে চরম শাব্দ-চাপ। সুতরাং $B/A=$ চাপ-প্রতিফলন-গুণাংক। তাহলে শাব্দ তীব্রতার প্রতিফলন-গুণাংক

$$I_r=\left(\frac{B}{A}\right)^2=\frac{(R_0-\rho_0 c/S)^2+X_0^2}{(R_0+\rho_0 c/S)^2+X_0^2} \qquad (১৪-৫.১৫)$$

এবং শাব্দতীব্রতার প্রেরণ-গুণাংক

$$I_t=1-\left(\frac{B}{A}\right)^2=\frac{4R_0\rho_0 c/S}{(R_0+\rho_0 c/S)^2+X_0^2} \qquad (১৪-৫.১৬)$$

এখানে $(Z_a)_0=R_0+jX_0$ — পরিচিত সম্পর্ক, R_0 শাব্দ বাধ, X_0 শাব্দ প্রতিক্রিয়তা, জটিল শাব্দবাধের দুই সমকোণী উপাংশ।

আলোচনা : ১৪-৫.১২ থেকে দেখা যাচ্ছে যে, নলে স্থাণুতরঙ্গ থাকলে ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে শাব্দবাধের মান x-এর ওপর নির্ভর করে এবং কাজেই

$\tan \beta x$-এর মান অনুযায়ী Z_a-র মান শূন্যও হতে পারে, আবার অসীমও। খোলা এবং বন্ধ নলে সুস্পন্দবিন্দুশ্রেণী নলের অক্ষ বরাবর আছে ধরে নিয়ে অনুনাদী কম্পাংকশ্রেণী বার করতে হলে, ১৪-৫.৯ সমীকরণ থেকে পাব

(১) $x=l$ বিন্দুতে মুখ খোলা থাকলে $(Z_a)_l=0$ হবে, কারণ সেখানে কণার সরণে কোন বাধা নেই ; অর্থাৎ

$$\tan \omega l/c = \tan 2\pi n_m l/c = 0 = \sin 2\pi n_m l/c$$

$$\therefore \quad 2\pi n_m l/c = m\pi \text{ বা } n_m = mc/2l \qquad (১৪\text{-}৫.১৭)$$

(২) $x=l$ মুখ বন্ধ থাকলে $(Z_a)_l=\infty$, কেননা এই সীমা অনড়। তাহলে $\tan \omega l/c = \infty$.

$$\therefore \quad 2\pi n_m l/c = (2m+1)\pi/2$$

$$\text{বা } n_m = (2m+1)c/4l \qquad (১৪\text{-}৫.১৮)$$

এরা ১৪-২.৫ এবং ১৪-২.৬-এর সঙ্গে অভিন্ন।

১৪-৬. বায়ুস্তম্ভের অনুনাদী কম্পাংকের নিয়ন্ত্রক :

আমরা এইমাত্র দেখলাম যে, খোলা নলে বায়ুস্তম্ভের স্বভাবী কম্পাংক $mc/2l$ আর বন্ধ নলে $(2m+1)c/4l$ হয়। সুতরাং এই এই কম্পাংকের তরঙ্গ যথাযথ নলে ঢুকলে অনুনাদ হবে। সুতরাং অনুনাদী কম্পাংক, নলের দৈর্ঘ্য এবং তার মধ্যে শব্দবেগের ওপর নির্ভরশীল। আবার ৬-৮ অনুচ্ছেদ অনুসারে শব্দের বেগ গ্যাসীয় মাধ্যমের ঘনত্ব-নির্ভর ; সেই ঘনত্ব আবার মাধ্যমের উষ্ণতা, আর্দ্রতা এবং উপাদানের ওপর নির্ভর করে। এ ছাড়া, তাত্ত্বিক আলোচনায় বলে, অনুনাদী বায়ুস্তম্ভের দৈর্ঘ্য নলের চেয়ে কিছুটা বড় ; এই বাড়তি দৈর্ঘ্যের নাম প্রান্তীয় ত্রুটি—নলের ব্যাসের সঙ্গে তা বাড়ে।

ক. শব্দবেগ ও অনুনাদী কম্পাংক : ৬-৮.১ সমীকরণে আমরা দেখেছি যে, গ্যাসীয় মাধ্যমে শব্দবেগ

$$c = \sqrt{\gamma p/\rho} = \sqrt{\gamma RT/M}$$

তাহলে নলে যদি বায়ু থাকে, তাহলে উষ্ণতা বাড়লে শব্দবেগ 61 সেমি/°সে. হারে বেড়ে চলবে এবং বায়ু ভিজে হলেও শব্দবেগ বাড়বে (কারণ আর্দ্রতা বাড়লে বায়ুর ঘনত্ব কমে, সুতরাং উষ্ণতা ও আর্দ্রতা বাড়লে শব্দবেগ দ্রুততর হয়), অতএব শব্দ তীক্ষ্ণতর হবে। বড় হলঘরে গানবাজনা চললে, তার পরিচয় মেলে। হলঘরে অনেক শ্রোতা থাকলে, উষ্ণতা 5° সে. হামেশাই বাড়ে।

ঘরের উষ্ণতা এবং বাদকের নিশ্বাসের গরমে বাতবাদ্যযন্ত্রে বায়ুস্তম্ভ উত্তপ্ত হতে থাকায় সুরখরতা বেড়েই যায় ; বড় বড় যন্ত্রে প্রথম এবং ছোট ছোট যন্ত্রে দ্বিতীয় কারণে সুরকম্পাংক বাড়ে। আবার বাদক ও শ্রোতাদের নিশ্বাসে এবং স্বেদের জলীয় বাষ্পে ঘরের বায়ুতে আর্দ্রতাও বাড়ে। তাই যন্ত্র-বাজানোর সময়ে বারবার সুরবন্ধন দরকার হতে পারে।

প্রশ্ন : 2.5 ফিট লম্বা এক অর্গান-নলের সঙ্গে $0°C$ উষ্ণতায় আর-একটি ছোট নল এবং আর-একটি সুরশলাকার মধ্যে 5টি স্বরকম্প হয়। ছোট নলটি এবং সুরশলাকার মধ্যে $22°C$ উষ্ণতায় ক'টি স্বরকম্প হবে ? [$0°C$ উষ্ণতায় শব্দবেগ 1100 ফি/সে আর প্রতি $1°C$ উষ্ণতাবৃদ্ধিতে বেগবৃদ্ধি 2 ফি/সে]

উত্তর : নলটি খোলা ব'লে $0°C$-এ তার মূল কম্পাংক $c/2l = 1100/5 = 220$/সে। ছোট নলের দৈর্ঘ্য কম, তাই তার কম্পাংক (n') হবে $220 + 5 = 225$/সে আর সুরশলাকার কম্পাংক 220 ± 5।

তাহলে ছোট নলের দৈর্ঘ্য $l' = c/2n' = 1100/(2 \times 225)$ ফি। সুতরাং $22°C$ বায়ুতে শব্দবেগ $1100 + 2 \times 22 = 1144$ ফি/সে ; তাই এই উষ্ণতায় কম্পাংক হবে $1144 \div 1100/225$ বা 234/সে। সুরশলাকার কম্পাংক উষ্ণতা-নিরপেক্ষ। তাই তাদের মধ্যে স্বরকম্পাংকের নির্ণেয় সংখ্যা $234 - (220 \pm 5) = 9$ বা 19 হবে। প্রথম ফলটিই কর্ণগ্রাহ্য।

খ. অনুনাদী কম্পাংক ও প্রান্তীয় ত্রুটি : নলের খোলা মুখে পৌঁছে নলের ভেতরের সমতলীয় তরঙ্গ চারিদিকে ছড়ানোর সুযোগ পেলে অর্ধগোলীয় তরঙ্গের রূপ (চিত্র 17.30) নেয়। কাজেই নলের খোলা মুখ, উৎসের সমতুল হয়ে যায় ; তাই সেখানে চাপ-নিস্পন্দবিন্দু হতে পারে না—তা হয় খোলা মুখ থেকে কিছুটা দূরে। এই দূরত্বই প্রান্তীয় ত্রুটি।

ধরা যাক, সংকোচন তরঙ্গের ক্রিয়ায় τ সময়ে কোন একটি স্তর ξ দূরত্ব স'রে গিয়ে পরের স্তরে শক্তি হস্তান্তর করে ; কিন্তু সেই সময়ে সংকোচনদশা $c\tau$ দূরত্ব অতিক্রম করবে। নলের প্রস্থচ্ছেদ S হলে, স্তরের সরণের ফলে $S\xi$ আয়তনের পরিবর্তন ঘ'টে $Sc\tau$ হয়ে দাঁড়ায়। নলের প্রান্তে $S\xi$ আয়তন $c\tau$ ব্যাসার্ধের অর্ধগোলককে পরিণত হবে। স্বভাবতই নলের অন্তিম স্তরটি তাহলে ξ দূরত্ব না স'রে অনেক বেশী দূরত্ব $c\tau$ সরবে। কাজেই নলের প্রান্তে সংকোচন শূন্য তো হবেই না, বরং $-ve$ মানের হবে, অর্থাৎ এখানে

সংকোচন না হয়ে প্রসারণ হবে। খোলা মুখ থেকে খানিক দূরে $\partial\xi/\partial x = 0$ (অর্থাৎ চাপ স্বাভাবিক হবে), সেই দূরত্বকেই প্রান্তীয় ত্রুটি (e) বলে।

সোজা খোলা-নলের দুই মুখেই প্রান্তীয় ত্রুটি থাকবে। অতএব মূল-সুর-নিনাদী বন্ধ নলে, $\frac{1}{4}\lambda = (l+e)$ এবং খোলা নলে তা $(l+2e)$ হবে। কাজেই সমদৈর্ঘ্য, দুইজাতীয় নলে তাদের মূল সুরের অন্তর আর এক অষ্টক থাকবে না —খোলা নলের মূল কম্পাংক বন্ধ নলের সেই কম্পাংকের দ্বিগুণের কিছু কম। বন্ধ নলে মূল সুরের তরঙ্গদৈর্ঘ্য

$$\lambda_0 = c/n_0 = 4(l+e) \qquad (১৪\text{-}৬.১)$$

অনুনাদী নলের সাহায্যে, জানা কম্পাংকের সুরশলাকা দিয়ে আর্দ্র বায়ুতে পরীক্ষাগারের উষ্ণতায়, শব্দবেগ সহজেই বার করা যায়। তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ থেকে র‍্যালে সিদ্ধান্ত করেন যে, সরল বেলনাকার নলে $e = r/\sqrt{3} \simeq 0.6r$ হবে। কাজেই **নল যত মোটা হবে, তার অনুনাদী কম্পাংক ততই কমবে।**

বন্ধ নলে প্রথম এবং দ্বিতীয় অনুনাদ যথাক্রমে বায়ুস্তম্ভের l_1 এবং l_2 দৈর্ঘ্যে ঘটলে, পাব

$$l_1 + e = \tfrac{1}{4}\lambda \text{ এবং } l_2 + e = \tfrac{3}{4}\lambda \text{ বা } e = \tfrac{1}{2}(l_2 - 3l_1) \qquad (১৪\text{-}৬.২)$$

২১-৪(খ) অনুচ্ছেদে লেখচিত্রের সাহায্যে পরীক্ষাগারে নলের প্রান্তিক ত্রুটি বার করার পন্থা আলোচিত হয়েছে।

প্রশ্ন ঃ একটি অনুনাদী নলের ওপর সুরশলাকা ধ'রে 24 এবং 74.1 সেমি দৈর্ঘ্যের বায়ুস্তম্ভে অনুনাদ পাওয়া গেল। পরীক্ষাগারের উষ্ণতায় শব্দবেগ 340 মি/সে এবং 0° সে উষ্ণতায় তা 330 মি/সে হলে সুরশলাকার কম্পাংক, পরীক্ষাগারের উষ্ণতা, এবং প্রান্তিক ত্রুটি বার কর।

[উঃ 339.3 চক্র/সে ; 16.5°সে ; 1.05 সেমি]

গ. অনুনাদী কম্পাংক এবং নলের ব্যাস ঃ আগের ১৪-৬.১ সমীকরণের আলোচনা-প্রসঙ্গে দেখা গেছে, নল মোটা হলে কম্পাংক কমে। স্মর্তব্য যে, ১৪-২ অনুচ্ছেদে যেসব সর্তাধীনে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন আলোচিত হয়েছে, তার মধ্যে অন্যতম হচ্ছে সান্দ্রতার প্রভাব নগণ্য ; নল মোটা হলে (ব্যাস >10 সেমি), তবেই বায়ুস্তরের স্পন্দনে সান্দ্রতার প্রভাব অগ্রাহ্য করা যায়। নল যতই সরু হবে, সান্দ্রতা ও তাপ-ব্যাপনতা-জনিত শক্তিক্ষয় ততই বাড়বে।

নলের অক্ষ বরাবর যেকোন স্তরের ওপর সংকোচন-তরঙ্গ প্রত্যাবর্তী

বল (p) প্রয়োগ করে। একক ক্ষেত্রের ওপর যদি সেই বল $\phi e^{j\omega t}$ মানের হয়, তাহলে বলবিস্তার হবে

$$\phi = -\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x}\left[K\left(-\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)\right] = \rho c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (১৪\text{-}৬.৩)$$

এখন যদি বায়ু-মাধ্যমে সান্দ্রতা-গুণাংক μ এবং সৃতি-সান্দ্রতা $\nu = \mu/\rho$ ধরা যায়, তাহলে নলের (ব্যাসার্ধ $= R$) শাব্দবাধের মান যে

$$Z_a = j\omega\rho + (j+1)\,\frac{2\mu}{R}\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}$$

$$= \frac{\mu}{R}\sqrt{\frac{2\omega}{\nu}} + j\sqrt{\omega}\left(\rho\sqrt{\omega} + \frac{\mu}{R\sqrt{2\nu}}\right) \quad (১৪\text{-}৬.৪)$$

হবে, তা দেখানো যায়। অতএব ব্যাস কমলে, শাব্দবাধ বাড়বে।

হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ ও কার্চফ দেখান যে, নলের মধ্যে r এবং $r + \delta r$ ব্যাসার্ধের বলয়ের ওপর সক্রিয় প্রত্যাবৃত্ত বলের সমীকরণ হয়

$$\phi = \left[j\omega\rho - \frac{\mu}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right)\right]\frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (১৪\text{-}৬.৫)$$

ϕ-এর দুই মান সমীকৃত করলে একটি অবকল সমীকরণ* পাই। তার সমাধান, $\xi = Ae^{-\alpha x}e^{j\omega(t-x/c)}$ থেকে (৬-১১.৭ দেখ) দেখানো যায় যে, শোষণ-গুণাংক এবং শব্দবেগ আসবে, যথাক্রমে

$$\alpha = \frac{1}{cR}(\tfrac{1}{2}\omega\nu)^{\frac{1}{2}} \text{ এবং } c = n\lambda\left(1 - \frac{1}{R}\sqrt{\frac{\nu}{2\omega}}\right) \quad (১৪\text{-}৬.৬)$$

এখানে c_0 $(= n\lambda)$ খোলা হাওয়ায় শব্দবেগ, n অনুনাদী কম্পাংক এবং তার সঙ্গে ব্যাসার্ধের (R) বিষম বা ব্যস্ত-অনুপাত; অর্থাৎ R বাড়লে n কমবে—এ-কথা আগেই দেখা গেছে।

নলের খোলা মুখে সমতলীয় তরঙ্গ যে গোলীয় তরঙ্গে পরিণত হয়, সে-কথা প্রান্তীয় ত্রুটির উৎপত্তি আলোচনা প্রসঙ্গে বলা হয়েছে। সেই কারণেই বিকিরণ-বাধের উৎপত্তি হয়—সেই বাধ কম্পাংকের বর্গের এবং সান্দ্রতাজনিত দমন-গুণাংকের বর্গমূলের আনুপাতিক। তাই নল যত সরু হতে থাকে ততই অবম রোধের জন্য দরকারী কম্পাংকের মান বাড়তে থাকে। অতএব নলের স্কেল (অর্থাৎ ব্যাস/দৈর্ঘ্য $= 2R/l$) যত কমবে (দৈর্ঘ্য অক্ষুণ্ন রেখে), অনুনাদী কম্পাংক ততই বাড়বে।

---

* $(1+2\nu\beta/\omega r)\,\ddot{\xi} + (2\nu\beta/r)\,\dot{\xi} = c^2.\partial^2\xi/\partial x^2$; $(\beta^2 = \omega/2\nu)$

১৪-৭. বায়ুস্তম্ভে স্থাণুতরঙ্গে সঞ্চিত শক্তি :

নলে স্থাণুতরঙ্গ সৃষ্ট হলে, স্বভাবতই সেখানে শক্তি সঞ্চিত হয়। পরপর দুই সুস্পন্দ বা দুই নিস্পন্দবিন্দুর মধ্যে এই সঞ্চিত শক্তির পরিমাণ তরঙ্গ-সমীকরণ থেকে সহজেই বার করা যায়। প্রতিফলন আংশিক হলে, আপতিত ও প্রতিফলিত তরঙ্গের সমীকরণ যথাক্রমে হয়

$$\xi_1 = a\cos(\omega t - \beta x) \text{ এবং } \xi_2 = b\cos(\omega t + \beta x)$$

তাহলে কোন এক বিন্দুতে কণাসরণ এবং কণাবেগ যথাক্রমে দাঁড়াবে

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = (a+b)\cos\omega t.\cos\beta x - (a-b)\sin\omega t.\sin\beta x$$

$$\dot{\xi} = -\omega\,[(a+b)\sin\omega t.\cos\beta x + (a-b)\cos\omega t.\sin\beta x']$$

কাজেই দুই নিস্পন্দ বা সুস্পন্দবিন্দুর মধ্যে সঞ্চিত গতিশক্তির মান হবে

$$E_k = \int_{(n-1)\lambda/2}^{n\lambda/2} \tfrac{1}{2}\rho.dx\,(\dot{\xi})^2 = \tfrac{1}{2}\rho\int_0^{\lambda/2}(\dot{\xi})^2 dx$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho\omega^2\int_0^{\lambda/2}\Big[(a+b)^2\sin^2\omega t\cos^2\beta x + (a-b)^2\cos^2\omega t.\sin^2\beta x + \tfrac{1}{2}(a^2-b^2)\sin 2\omega t.\sin 2\beta x\Big]dx$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho\omega^2\Big[\Big\{(a+b)^2\sin^2\omega t\int_0^{\lambda/2}\cos^2\beta x.dx\Big\} + \Big\{(a-b)^2\cos^2\omega t\int_0^{\lambda/2}\sin^2\beta x\,dx\Big\}\Big] + 0$$

$$= \tfrac{1}{2}\rho\omega^2\Big[(a+b)^2\sin^2\omega t.\tfrac{1}{4}\lambda + (a-b)^2\cos^2\omega t.\tfrac{1}{4}\lambda\Big]$$

$$= \tfrac{1}{8}\rho\omega^2\lambda\Big[(a+b)^2\sin^2\omega t + (a-b)^2\cos^2\omega t\Big] \quad (১৪\text{-}৭.২)$$

আবার সেই দুই বিন্দুর মধ্যেই সঞ্চিত স্থিতিশক্তির মান

$$E_p = \frac{1}{2}\rho\omega^2 \int_0^{\lambda/2} \xi^2 . dx = \frac{1}{2}\rho\omega^2 \Big[(a+b)^2 \cos^2\omega t \int_0^{\lambda/2} \cos^2 \beta x + (a-b)^2 \sin^2 \omega t \int_0^{\lambda/2} \sin^2 \beta x \Big] \cdot dx$$

$$= \frac{1}{8}\rho\omega^2\lambda \Big[(a+b)^2 \cos^2\omega t + (a-b)^2 \sin^2\omega t \Big] \quad (১৪\text{-}৭.৩)$$

তাহলে সঞ্চিত মোট শক্তির মান দাঁড়াবে

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{8}\rho\omega^2\lambda \; [(a+b)^2 + (a-b)^2]$$

$$= \frac{1}{4}\rho\omega^2\lambda \; (a^2 + b^2) = n^2\pi^2\rho\lambda \; (a^2 + b^2) \qquad (১৪\text{-}৭.৪)$$

আদর্শ খোলা নলে মূল সুর উদ্দীপিত হলে, $l = \frac{1}{2}\lambda$; কাজেই এই সমীকরণই সেক্ষেত্রে মোট শক্তির পরিমাণ্ নির্দেশ করছে। বন্ধ নলে মূল সুর বাজলে $l = \frac{1}{4}\lambda$, তখন তার মোট শক্তি, এর অর্ধেক। খোলা নলে m-তম উপসুর বাজলে, মোট শক্তি ১৪-৭.৪-এর m গুণ এবং বন্ধ নলে $(m + \frac{1}{2})$ গুণ হবে। বলা বাহুল্য, এখানে প্রান্তিক ত্রুটি উপেক্ষিত।

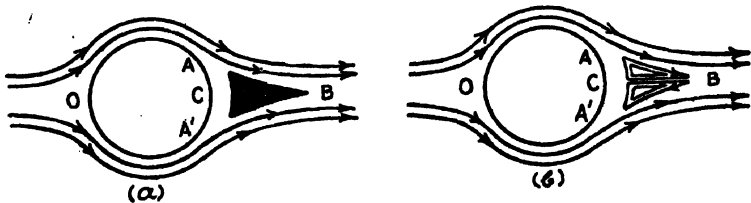
১৪-৮. ঘূর্ণিজ শব্দ :

স্থির প্রবাহী মাধ্যমে সরু প্রবাহী স্রোত ঢোকালে।সচল ও অচল অংশের বিভেদ-তলে বিচ্ছিন্নতা-স্তরের উৎপত্তি হয়। এইসব ক্ষেত্রে যথাযথ সর্তাধীনে প্রবাহী স্রোতে ঘূর্ণির উৎপত্তি হবে। আবার বহমান প্রবাহীর মধ্যে কোন কঠিন প্রতিবন্ধক রাখলেও তার পেছনে ঘূর্ণি হবে। প্রবাহী স্রোত এক সীমান্তমানের উর্ধ্বে পৌঁছলে ঘূর্ণিগুলি যেকোন কঠিন বস্তুর টুক্‌রোর মতোই স্রোতে ভেসে যাবে।

স্থির খানিকটা বায়ুতে সরু বায়ুপ্রবাহ অনুপ্রবিষ্ট করালে এইরকম সচল ঘূর্ণিমালার উৎপত্তি হয় ; 14.8 চিত্রে এদের একান্তরী (alternate) উৎপত্তি এবং ঘূর্ণনদিক্ দেখানো হয়েছে। এদের একান্তরী অবস্থান এবং বিপরীতমুখী ঘূর্ণন, প্রবাহী স্রোতকে পর্যায়ক্রমে ধাক্কা দিতে থাকে। এই ধাক্কা বা বিক্ষোভসংখ্যা কর্ণগ্রাহ্য কম্পাংকপাল্লায় পৌঁছলেই শব্দ শোনা যাবে। বাতবাদ্যযন্ত্রে (wind instruments) টানা সুরোৎপত্তিতে ঘূর্ণির উপস্থিতি অপরিহার্য। বায়ুস্রোত (১) আড়াআড়িভাবে সরু তন্তুর মতো বাধায় (যেমন —তার, দীর্ঘ ঘাস বা ঝাউপাতায়) পড়লে, বা (২) সরু ফলকে পড়লে, কিম্বা

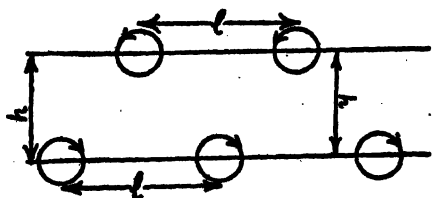
(৩) সরু ফুটো দিয়ে বেরিয়ে স্থির বায়ুমাধ্যমে ঢুকলে, স্রোতের পথ এঁকেবেঁকে (sinous) চলে (চিত্র 14.9) এবং যোগ্য সর্তাধীনে শব্দের উৎপত্তি ঘটায় ; এরা যথাক্রমে **বায়ব, ফলকজ** এবং **রন্ধ্রজ** সুর। বাস্তব ক্ষেত্রে দ্বিতীয় শ্রেণীর ভূমিকাই প্রধান—বাঁশী প্রভৃতি অর্গান নলে এই থেকেই সুরোৎপত্তি।

প্রবাহী মাধ্যমে আবর্তের সৃষ্টি : খরস্রোতে অনড় প্রতিবন্ধক থাকলে, তার পেছনে আবর্ত বা ঘূর্ণি হয় ; জোর জলস্রোতে আঙুল ডোবালেই তা দেখতে পাবে। আবার কঠিন বস্তুকে জলের মধ্যে দিয়ে দ্রুত টেনে নিয়ে গেলেও (যেমন চলন্ত নৌকার হাল) প্রতিবন্ধকের পেছনে আবর্তের সৃষ্টি হয় ; দ্রুতগামী বুলেটের পেছনে বায়ুতে উদ্ভূত আবর্তের উপস্থিতি 7.9 আলোকচিত্রে লক্ষ্য কর। আপেক্ষিক বেগের কারণে প্রবাহী ও প্রতিবন্ধকের সীমাতলে প্রবল ঘর্ষণ হয় ; তাতে উদ্ভূত কৃন্তন-বিকৃতির ফলেই ঘূর্ণিগুলি উৎপন্ন হয়। তারা দুই সমান্তরাল সারি বরাবর জন্মায়, চলে (চিত্র 14.8) এবং উল্টো মুখে ঘোরে।

14.7 (a) এবং (b) চিত্রে নিয়মিত জলস্রোতের মধ্যে খাড়াভাবে একটি বেলন বসিয়ে আবর্তসৃষ্টির ব্যাখ্যা করা হয়েছে। জলস্রোত যখন ধীর অর্থাৎ শান্ত (streamline) তখন AB ও $A'B$ দুই বিচ্ছিন্নতা-স্তর-সীমিত ABA' এলাকার মধ্যে জল স্থির ; স্রোত যখন খরতর কিন্তু তবু শান্ত, তখন এই দুই সীমাতল সাপেক্ষে জলস্রোত প্রচণ্ড কৃন্তন-বলের সৃষ্টি করে ; ফলে AB এবং $A'B$ স্তরের মধ্যে সীমাতলে নিয়মিতভাবে দুই বিষমাবর্তী আবর্তমালা জন্মায় ; এই অংশে তখন সাম্যাবস্থা অস্থির। স্রোত আরও খরতর হয়ে শান্ত-সীমা পেরিয়ে গেলে ঘূর্ণিগুলি আর বেলনের গায়ে লেগে থাকে না, ছেড়ে বেরিয়ে

চিত্র 14.7—স্রোতে প্রতিবন্ধকের পেছনে আবর্ত-সৃষ্টি

এসে কঠিন গোলকের মতো সরলরেখা বরাবর ভেসে চলে যায় (জল গরম করতে থাকলে যেমন পাত্রের গায়ে বুদ্‌বুদ দেখা দেয় এবং কোন এক উষ্ণতা

অতিক্রান্ত হলে, তারা ঝাঁক বেঁধে সরলরেখার ওপরে উঠে আসে)। এদের চলন এবং ঘূর্ণনই শব্দসৃষ্টির জন্যে দায়ী।

এরা সার বেঁধে দুই সমান্তরাল রেখায় চলে। নিয়মিতভাবে তখনই ঘূর্ণিসৃষ্টি হতে থাকে যখন প্রতিবন্ধকের দুই ধার থেকে একান্তরিতভাবে তারা বেরোতে (চিত্র 14.8) থাকে। এই একান্তরী ঘূর্ণিশ্রেণী বিষমাবর্তী হওয়ায়, তারা মধ্যবর্তী স্রোত বা মাধ্যমকে চলনপথের আড়াআড়ি দিকে পর্যায়ক্রমে ধাক্কা দিতে থাকে ; 14.9 চিত্রে এই ক্রিয়াপ্রসূত স্রোতের সর্পিল পথ দেখানো হয়েছে ; জোর হাওয়ায় পতাকার পত্ পত্ শব্দে ওড়ার বা বায়ুস্রোতের বরাবর লম্বা কাপড় মেলা থাকলে, তার এঁকেবেঁকে ওড়ার ভঙ্গী, সর্পিল স্রোতের চাক্ষুষ প্রমাণ।

চিত্র 14.8—একান্তরী আবর্তমালা

ক. বায়ব স্বর (Aœlean tones)ঃ কবির ভাষায়, "ঝাউ-এর ঝাড়ে বাজায় বাঁশী পৌষপাগল বুড়ী", অর্থাৎ খুব সরু দীর্ঘ পাতার ঘন-সন্নিবিষ্ট লম্বা লম্বা গাছের মধ্যে বা তৃণভূমির লম্বা লম্বা ঘাসের মধ্যে দিয়ে জোরে হাওয়া বইলে শোঁ-শোঁ শব্দ শোনা, গ্রামের লোকের সাধারণ অভিজ্ঞতা। টেলিগ্রাফের বা বৈদ্যুতিক তারের আড়াআড়ি বায়ুস্রোত বইলে, টানা তীক্ষ্ণসুর শোনাও অনেকসময় রেলযাত্রীদের অভিজ্ঞতায় হয়ে থাকে। এইজাতীয় সুরকে **বায়ব স্বর** বলে। একটা কাচনলের আড়াআড়ি সরু তার রেখে, জানলা বা দরজার সরু ফাঁকের সামনে ধরলে, অনেকসময়েই নলের অপরপ্রান্তে কান পেতে তীক্ষ্ণ ও স্থায়ী বিশুদ্ধ বায়ব সুর শোনা সম্ভব। এয়ারোপ্লেনের প্রপেলার-ব্লেডের ঘূর্ণনজাত বিকট অপসুরও বায়ব-শ্রেণীর শব্দ।

তাত্ত্বিক আলোচনা ঃ বায়ব সুরের উৎপত্তি নিয়ে স্ট্রাউহল নামে এক বিজ্ঞানী নিয়মিত এবং ফলপ্রসূ পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালান। তিনি একটি খাড়া ফ্রেমের একপাশে তার আট্‌কে, ফ্রেমটিকে তারের সমান্তরাল এক খাড়া অক্ষের সাপেক্ষে ভিন্ন ভিন্ন বেগে ঘুরিয়ে ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে বায়ব সুর উৎপন্ন করান। দেখা গেল যে, সেইসব কম্পাংক, তারের দৈর্ঘ্য- এবং টান- নিরপেক্ষ কিন্তু তারের ব্যাস (d) এবং ঘূর্ণনবেগ (v) এই দুয়ের ওপর নির্ভরশীল ; সেই কম্পাংকের মান

$$n_A = 0.185\, v/d \qquad (১৪\text{-}৮.১)$$

স-টান তার থেকে একান্তরী আবর্তচ্যুতি এবং তাদের ক্রিয়ায় বায়ুস্রোতের সাঁপল গতি, তারের ওপরে প্রত্যাবর্তী অনুপ্রস্থ বল প্রয়োগ ক'রে তাকে কাঁপায়। স্রোতোবেগ যদি এমন হয় যে n_A, স-টান তারের নিজস্ব কম্পাংকের $[n=(m/2l)\sqrt{T/\mu}]$ যেকোনটির সমান হয়, তাহলে অনুনাদী স্পন্দন হয়ে শব্দ অনেকটা জোরালো হয়।

আবর্তের দুই সারির (চিত্র 14.8) মধ্যে ব্যবধান h এবং যেকোন সারিতে দুই ক্রমিক ঘূর্ণির মধ্যে তফাৎ l হলে, h/l অনুপাত d বা v-র ওপর নির্ভর করে না। যদি মাধ্যম-সাপেক্ষে ঘূর্ণির চলার বেগ u আর সেকেণ্ডে উৎপন্ন আবর্তসংখ্যা n হয়, তাহলে তারের স্পন্দনসংখ্যা হবে

$$n=n_A=(v-u)/l \text{ বা } 1/n_A=l/(v-u)$$

$$\frac{v}{nd}=\frac{v}{d}\cdot\frac{l}{v-u}=\frac{l}{d}\cdot\frac{v}{v-av}$$

$$=\frac{bd}{d}\cdot\frac{v}{v(1-a)}=\frac{b}{1-a} \qquad (১৪\text{-}৮.২)$$

এই সমীকরণ ক্রুগার-এর তাত্ত্বিক বিশ্লেষণের ফল। a এবং b এতে দুটি নবাগত ধ্রুবক ; প্রথমটির মান 1-এর কম, দ্বিতীয়টির, 1-এর বেশী ; তাত্ত্বিক সিদ্ধান্ত থেকেও পাওয়া যায়, $b=l/d$ এবং $a=u/v$; কার্মান-এর পরীক্ষণে সমীকরণের ডান দিকের মান 5-এর কাছাকাছি আসে এবং সেটি স্ট্রাউহল-এর পরীক্ষণ-ফলের $(1/0.185=5.4)$ সঙ্গে মিলে যায়। র্যালে-র মতে, বায়ব সুরের কম্পাংক

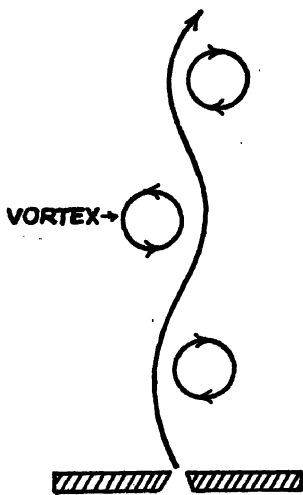
$$n_A=0.195\frac{v}{d}\left(1-\frac{20.1\nu}{vd}\right)$$

$$=0.195\frac{v}{d}(1-20.1/N) \qquad (১৪\text{-}৮.৩)$$

সূত্রের সাহায্যে আরও নির্ভুলভাবে প্রকাশ করা যায়। এতে N রেনল্ড-এর সংখ্যা এবং সৃতি-সান্দ্রতা $\nu=\eta/\rho=vd/N$। সাধারণভাবে বায়ব সুরের কম্পাংকের ওপর সান্দ্রতার প্রভাব সামান্যই ; কিন্তু তার উৎস, ঘূর্ণির উৎপত্তি হতে হলে স্রোত অশান্ত হওয়া চাই, অর্থাৎ স্রোতোবেগ ক্রান্তিক (critical) মানের চেয়ে বেশী হতে হবে। ক্রান্তিক বেগ, প্রবাহীর সান্দ্রতাংক এবং ঘনত্বের অনুপাতের (η/ρ) ওপর নির্ভর করে এবং প্রবাহীর রেনল্ড-সংখ্যা প্রয়োজনীয়

মানের বেশী হলে, তবে ঘূর্ণি হতে সুরু করে। রিচার্ডসন নলের মধ্যে জল এবং বায়ু প্রবাহিত ক'রে এবং ভিন্ন ভিন্ন স্রোতের মুখে বিভিন্ন ব্যাসের স-টান তার রেখে ১৪-৮.৩ সমীকরণের সমর্থন পেয়েছেন।

বাইবেল এবং প্রাচীন গ্রীক উপাখ্যানে বায়ব বীণার উল্লেখ মেলে। এই বীণাতে একটি শব্দপেটির ওপর কয়েকটি ক্রমবর্ধমান ব্যাসের এবং দৈর্ঘ্যের তার টান দিয়ে বাঁধা থাকত। তারা সবাই একই নিম্নকম্পাংকে সুরবন্ধনে থাকায়, তাদের উপসুরগুলি বিভিন্ন শ্রবণপাল্লা জুড়ে থাকত। এই বীণা বায়ুস্রোতে থাকলে, এক বা ততোধিক তারে অনুনাদ হয়ে যথাযথ সুর বাজত। সুরকম্পাংক-নিয়ন্ত্রণের কোন ব্যবস্থা না থাকায়, বাদ্যযন্ত্র হিসাবে বায়ব বীণা কেবল একটি খেলনা মাত্র।

খ. রন্ধ্র সুর (Jet tone): গরম কেট্‌লির নল বা বয়লারের ফুটো থেকে উচ্চচাপে বাষ্প বেরোতে থাকলে, শোঁ-শোঁ আওয়াজ শোনা যায়। স্টেশনে দাঁড়িয়ে বাষ্পীয় এঞ্জিন স্টীম ছাড়তে থাকলেও এই শব্দ হয়। উচ্চচাপে গ্যাসীয় স্রোত দীর্ঘ রন্ধ্র (slit) দিয়ে বেরিয়ে স্থির বায়ুতে পড়লে, যে টানা সুর শোনা যায়, তাকে রন্ধ্র সুর বলে। বায়ব সুরের মতোই বিষমাবর্তী একান্তরী ঘূর্ণিমালা থেকে এই সুর উৎপন্ন হয়; খালি তফাৎ এই যে, এখানে আলোড়ন হয় মধ্যবর্তী বায়ুমাধ্যমের (চিত্র 14.9)।

চিত্র 14.9
রন্ধ্রসুরের উৎপত্তি

রন্ধ্রনিঃসৃত বায়ুস্রোত স্থির বায়ুস্রোতে অন্তঃপ্রবিষ্ট হওয়ায় বিচ্ছিন্নতা-তলের সৃষ্টি হয় এবং এই স্রোত পর্যায়ক্রমে একান্তরী বিষমাবর্তী ঘূর্ণি উৎপন্ন করতে থাকে এবং ফলে অনুপ্রস্থ বলের প্রতিক্রিয়ায় নিজেই সর্পিল পথে চলে। আগের মতোই ঘূর্ণিগুলির h/l অনুপাত ধ্রুবক ($=0.28$) হয়। ঘূর্ণিগুলির স্থায়িত্ব ও পর্যাবৃত্তি দুইই অনিশ্চিত হওয়ায় রন্ধ্রসুর ক্ষীণ এবং অস্থির। এক্ষেত্রে কম্পাংক আসে

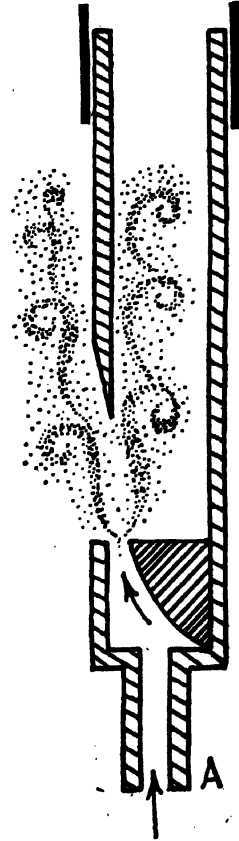
$$n_J = 0.045\, v/d \qquad (১৪\text{-}৮.৪)$$

অর্থাৎ ব্যঞ্জকটি বায়ব কম্পাংকেরই অনুরূপ, খালি ভেদ-ধ্রুবক তার সিকিভাগ,

আর d রন্ধ্রব্যাস। কাজেই বায়ু তারে পড়লে এবং সমবেগে তারের সমব্যাসের ফুটো থেকে বেরোলে রন্ধ্রসুর বায়ব সুরের প্রায় দুই অষ্টক নিচে থাকে।

গ. **ফলক-সুর** (Edge tones): দীর্ঘ, ফালি রন্ধ্র থেকে খর বায়ুস্রোত একটা পাতের আকারে (blade) বেরোয়। সেই বায়ুস্রোত একটা ক্ষুরধার ধাতু বা কাঠের সমান্তরাল ফলকের ওপর পড়লে, যে একান্তরী আবর্তসারি উৎপন্ন হয়, তারা সুস্থিত (stable) হয়। তারা স্থায়ী এবং সুনির্দিষ্ট কম্পাংকের যে সুরসৃষ্টি ঘটায় তাকে **ফলক-সুর** বলা চলে। এইরকম ব্যবস্থায় ঘূর্ণির উৎপত্তি 14.10 চিত্রে দেখানো হয়েছে।

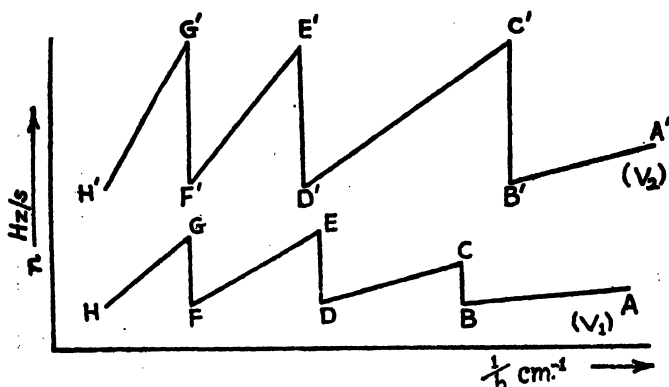
রন্ধ্র থেকে বেরিয়ে বায়ুস্রোত ফলক-শীর্ষে পড়ে। ফলক-শীর্ষ রন্ধ্র থেকে সঠিক দূরত্বে থাকলে বায়ুস্রোতকে দ্বিধাবিভক্ত করে এবং উৎপন্ন ঘূর্ণিমালা ফলকের দুইপাশ দিয়ে উঠে যেতে থাকে। যাওয়ার সময়ে ঘূর্ণি খানিকটা বায়ু স্থানচ্যুত করে; সে চলে যাওয়ার পর স্থানচ্যুত বায়ু নিজের জায়গায় ফিরে আসে এবং তার ধাক্কায় বায়ুস্রোত ফলকের অন্যপাশে চলে যায়—ফলে, সর্পিল সঞ্চারপথের উৎপত্তি হয়; স্থানচ্যুতি এবারে একটু বেশী হলে সাময়িক এক আংশিক শূন্যের সৃষ্টি হয়। তাতে বায়ুস্রোতের যে অংশ ফলকে এসে পৌঁছয়নি, তাতেও এই বিক্ষোভ গিয়ে পৌঁছয়। বায়ুস্রোতের নিঃসরণ-বেগ এবং রন্ধ্র থেকে ফলকের দূরত্বের ওপর, এই বিক্ষোভের বিস্তৃতি নির্ভর করে। সেই অনুসারে সর্পিল বায়ুস্রোতের প্রথম, দ্বিতীয় ও তৃতীয় শীর্ষ থেকে ঘূর্ণি উৎপন্ন হতে সুরু করে।

চিত্র 14.10—ফলক-সুরের সৃষ্টি

বায়ুস্রোতের নিঃসরণ (efflux)-বেগ v, ঘূর্ণির চলার রৈখিক বেগ u, একই সারিতে দুই ঘূর্ণির মধ্যে ব্যবধান l হলে, প্রথম বা মূল সুর শোনা যাবে, যখন রন্ধ্র এবং ফলক-শীর্ষের মধ্যে দূরত্ব $r_1 = l$ হবে। তখন

$$n_E = u/l = av/r_1 \text{ অর্থাৎ } v/n_E r_1 = \text{ধ্রুবক} \qquad (১৪-৮.৫)$$

এবার এই ব্যবধান r বাড়াতে থাকলে কম্পাংক কমতে থাকে ; কিন্তু বর্ধিত ব্যবধান $2r$ হলে, সুরকম্পাংক হঠাৎ এক অষ্টকের মতো লাফিয়ে বেড়ে ওঠে—তখন দুই ঘূর্ণির মধ্যে দূরত্ব l, দুই সারির মধ্যে দূরত্ব $h/2$ এবং রন্ধ্র ও ফলক-শীর্ষের মধ্যে দূরত্ব $2r_1$ হয়। দূরত্ব r বাড়িয়ে-বাড়িয়ে এইভাবে চারটি ক্রমে (step) ফলক-সুর-উৎপাদন সম্ভব এবং তখন ওপরের সমীকরণে সাংখ্যমান m বসিয়ে তার সংশোধিত রূপ দাঁড়ায়

$$mv/n_{E}r = \text{ধ্রুবক} \qquad (১৪\text{-}৮.৬)$$

14.11 চিত্রে দুটি ভিন্ন বায়ুবেগে r বাড়িয়ে বাড়িয়ে চারটি ধাপে অসন্তত সুরসৃষ্টি ব্যাখ্যা করা হয়েছে। r অক্ষুণ্ণ রেখে আবার ক্রমে ক্রমে v বাড়িয়েও এই ব্যাপার ঘটানো যায়। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে শক্তি বেশী থাকায় শব্দ জোরালো হয়। বায়ুনিঃসরণ-বেগ (v_0) এবং রন্ধ্র-ফলক-ব্যবধান (r_0) ক্রান্তিক মানের উর্ধ্বে হলেই, তবে ফলক-সুর উৎপন্ন হতে পারে ; কারণ vL/ν রাশিটি

চিত্র 14.11—ফলক-সুরের কম্পাংকশ্রেণী

এক ক্রান্তিক মানের নিচে থাকলে, ঘূর্ণির সৃষ্টিই হবে না। এই L রাশিটি—রন্ধ্র-ফলক ব্যবধান (r), রন্ধ্রের ব্যাস (d) এবং রন্ধ্রমুখে পৌঁছানোর আগে বায়ুস্রোত যে নালী পথে এসেছে তার আকার, এই তিনটি ভেদী রাশির ওপর নির্ভর করে, সুতরাং তার মান অনিশ্চিত। এক্ষেত্রেও বায়ব সুরের মতোই ঘূর্ণি সুরু হওয়ার পর, বায়ুস্রোত সান্দ্রতা-নিরপেক্ষ হয়ে যায়।

সূক্ষ্মতর এবং সযত্ন পরীক্ষায় ফলক-সুরের কম্প্যাংক-সূত্র মিলেছে

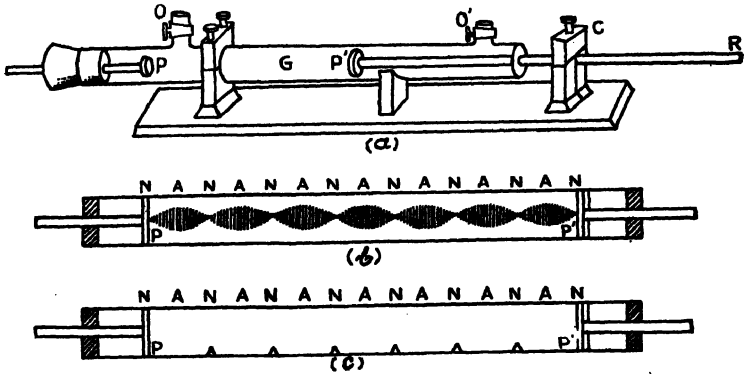
$$n_{E} = 0.466\, m(v - 40)(1/r - 0.07) \qquad (১৪\text{-}৮.৭)$$

এখানে m-এর সাংখ্যমান যথাক্রমে 1.0, 2.3, 3.8 এবং 5.4 ; এরা সবাই অখণ্ড নয়—তাই সুরগুলি বিষমমেল।

ফলক-সুরের ব্যবহারিক গুরুত্ব যথেষ্ট, কারণ বাঁশি, অর্গান-নল, ক্ল্যারিওনেট, পিকোলো প্রভৃতি বাতবাদ্যযন্ত্রে ঘূর্ণিবিক্ষুব্ধ বায়ুস্তর থেকেই ফলক-সুর উৎপন্ন হয়। এইসব যন্ত্রে বায়ুস্তম্ভ এবং ঘূর্ণিবিক্ষুব্ধ স্তরের মধ্যে যুগ্মস্পন্দনই সুরসৃষ্টির মূল কারণ।

৯-২(৪) অনুচ্ছেদে আমরা শব্দসন্ধানী হিসাবে সুবেদী শিখা (sensitive flame) আলোচনা করেছি। বহু গবেষণা থেকে প্রতিষ্ঠিত হয়েছে যে, তাদের শব্দগ্রাহিতার কারণ, শব্দতরঙ্গের আঘাতে দাহ্য গ্যাসে উদ্ভূত ঘূর্ণিদলের বিশেষ প্রতিক্রিয়া। সুবেদী শিখা এবং ফলক-সুর মূলত সদৃশ ঘটনাপ্রসূত।

১৪-৯. Kundt-নলে বায়ুস্পন্দন :

এক-মুখ-বন্ধ বায়ুস্তম্ভে নিয়মিত স্পন্দনজাত স্থাণুতরঙ্গের উপস্থিতি এবং আচরণবৈশিষ্ট্য, এই অতি সরল পরীক্ষণ-ব্যবস্থা থেকে দেখানো যায়; 14.12-চিত্রের তিনটি ছবিতে যন্ত্রসজ্জা এবং পরীক্ষণ-ফলাফল দেখানো হয়েছে। (*a*) চিত্রে G একটি $1\frac{1}{2}$ বা 2 মিটার লম্বা এবং 5 সেমি ব্যাসের

চিত্র 14.12—Kundt-নলে স্থাণুস্পন্দন

কাচনল ; তার দুই খোলা মুখে P এবং P' দুটি পিস্টন-চাক্‌তি, তাদের ব্যাস নলের চেয়ে সামান্য ছোট। $P'R$ পিস্টন-দণ্ডটি মধ্যবিন্দু C-তে দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ। P চাক্‌তিটি সরিয়ে সরিয়ে PP' বায়ুস্তম্ভের দৈর্ঘ্য বদলানো যায়। নলটিকে শুকিয়ে নিয়ে, তার ভেতরে খুব হাল্‌কা ক'রে খুব মিহি কর্কের গুঁড়ো সুষমভাবে ছড়ানো হয়। CR বরাবর ভিজে কাপড় বা কর্কশ চামড়া বা রজন-লাগানো কাগজ জড়িয়ে ধ'রে সজোরে জোরে টানলে, P'-এর নিজস্ব কম্পাংকে অনুদৈর্ঘ্য

স্পন্দন ঘটে। তাতে নলের মধ্যে বায়ুস্তম্ভের পরবশ কম্পন হয়। P-এর অবস্থান নিয়ন্ত্রণ ক'রে বায়ুস্তম্ভে অনুনাদী স্পন্দন বা অনুদৈর্ঘ্য স্থাণু-তরঙ্গ প্রতিষ্ঠা করা যায়। তখন নলের পাশ থেকে দেখলে, দেখা যায় (14.12c চিত্র) যে কর্কের গুঁড়োগুলি জায়গায় জায়গায় ছোট ছোট ঢিবির মতো জমা হয়েছে; আবার নলের ওপরদিক থেকে দেখলে গুঁড়োগুলিকে নলের দেয়াল বরাবর, অক্ষের সমকোণে বিলেখের (striations) আকারে (14.12b) সজ্জিত থাকতে দেখা যায়; তাদের আকার পঞ্জরাস্থির (ribs) মতো এবং অক্ষ বরাবর তাদের দৈর্ঘ্যের পর্যায়ক্রমে বাড়া-কমাও লক্ষিত হয়; সুস্পন্দবিন্দুগুলিতে (A) বিলেখ-দৈর্ঘ্য সর্বাধিক, নিস্পন্দবিন্দুতে (N) সবচেয়ে কম, কারণ ঢিবিগুলি সেইখানেই জমে। দুই ঢিবির শীর্ষের বা দুই দীর্ঘতম বিলেখের মধ্যে দূরত্ব $\frac{1}{2}\lambda$ হবে।

এখন $P'R=l$ হলে, দণ্ড মধ্যবিন্দুতে আবদ্ধ ব'লে P' চাকতির কম্পাংক ১৩-৩.৬ সমীকরণ অনুযায়ী $n=(1/2l)\sqrt{q/\rho}$ এবং $c_s=n\lambda=n.2l$ হওয়ায়, আমরা কঠিনে শব্দের বেগ (c_s), সেই কঠিনের ঘনত্ব এবং ইয়ং-গুণাংকও বার করিতে পারি। তা ছাড়া, P' চক্র এবং নলের বায়ুস্তম্ভের মধ্যে অনুনাদ হওয়ায়, তার কম্পাংকও n; কাজেই n এবং $\frac{1}{2}\lambda$-র মাপ থেকে বায়ুতে শব্দের বেগ পাওয়া সম্ভব। নলটিতে বায়ুর চাপ বদ্‌লে বা তার উষ্ণতা বদ্‌লে, কিম্বা অন্য গ্যাস ঢুকিয়েও শব্দবেগ বার করতে পারি। আবার যেকোন গ্যাসে শব্দবেগ ($c_g=\sqrt{\gamma RT/M}$) বার ক'রে তার γ-র ($=C_p/C_v$) মান খুব সহজেই অথচ যথেষ্ট সূক্ষ্মভাবে নির্ণেয়। এই γ-র মান থেকে আণবিক গঠন (অর্থাৎ পরমাণু-সংখ্যা) এবং c_g-র মান থেকে আণবিক ভার (M) বার করা চলে। ২১ অধ্যায়ে আমরা এ-সম্পর্কে বিস্তারিত পরীক্ষণ-প্রণালী আলোচনা ক'রবো।

উদাহরণ: র‍্যাম্‌জে-র পরীক্ষায় Kundt-নলে একই সর্তাধীনে বায়ু এবং আর্গন গ্যাসে সুস্পন্দচক্রের মধ্যে দূরত্ব 3.46 এবং 3.16 সেমি আসে। তিনি কি ক'রে সিদ্ধান্ত করলেন যে, আর্গনের অণুতে পরমাণু মোটে একটি?

[প্রদত্ত: $\gamma_a=1.41$ এবং $\rho_a/\rho_g=129/178$]

সমাধান: বায়ুতে ও আর্গন গ্যাসে শব্দবেগের অনুপাত

$$\frac{c_a}{c_g}=\sqrt{\frac{\gamma_a P/\rho_a}{\gamma_g P/\rho_g}}=\sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_g}\cdot\frac{\rho_g}{\rho_a}}=\frac{n\lambda_a}{n\lambda_g}$$

$$\therefore \quad \frac{\gamma_g}{\gamma_a} = \frac{\rho_g}{\rho_a} \cdot \left(\frac{\lambda_g}{\lambda_a}\right)^2$$

বা $\gamma_g = \gamma_a \frac{\rho_g}{\rho_a} \cdot \left(\frac{\lambda_g/2}{\lambda_a/2}\right)^2 = 1.41 \times \frac{178}{129} \times \left(\frac{3.16}{3.46}\right)^2 = 1.64$

এখন, এক-পরমাণু গ্যাসের γ-মান তত্ত্বমতে 1.67 ; তা থেকেই র‍্যাম্‌জে-র সিদ্ধান্ত আসে।

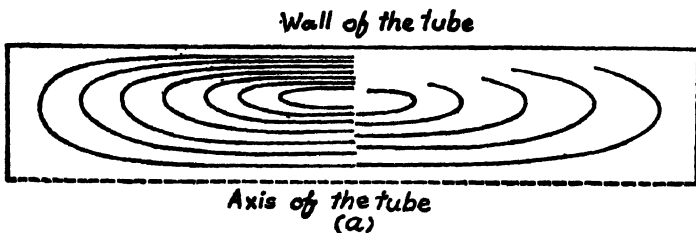
প্রশ্ন : 20° সে উষ্ণতায় মিথেন-গ্যাস-ভরা নলে উত্তেজক কম্পাংকের মান 110/সে হলে, নিস্পন্দবিন্দুগুলির গড় ব্যবধান 20 সেমি আসে। মিথেনের স্বভাবী ঘনত্ব 0.7168 গ্র্যাম/লিটার হলে, তার γ-মান কত ?

(উঃ 1.28)

Kundt-নলে বিলেখের উৎপত্তি-বিচার ; আঁন্দ্রাদ-এর পরীক্ষা : স্পন্দনশীল নলে নিস্পন্দবিন্দুগুলিতে কর্কের গুঁড়ো ঢিবি হয়ে জমে আর দুই নিস্পন্দবিন্দুর মধ্যে নলের গায়ে গুঁড়োগুলি ক্রম-পরিবর্তী দৈর্ঘ্যের বিলেখরেখার আকারে সজ্জিত হয়—এ কথা আগেই বলেছি। স্পন্দন খুব জোরে হলে, সুস্পন্দবিন্দুতে গুঁড়োগুলি নলের ভেতরের পরিধি বরাবর চক্রাকারে সজ্জিত হতে পারে। এই সুস্পন্দচক্রগুলি খুবই স্পষ্ট এবং খর। এইসব পরীক্ষণ থেকে শব্দতরঙ্গে বায়ুকণার সরণবিস্তার, শাব্দক্ষেত্রে দুই স্পন্দনশীল কণার মধ্যে পারস্পরিক বলের মান নির্ণয়, আবর্তগতি এবং চলপ্রবাহী-বিদ্যার (hydrodynamics) নানা তাত্ত্বিক সমস্যা সম্পর্কে প্রয়োজনীয় তথ্য সংগৃহীত হয়েছে। এ-সম্পর্কে র‍্যালে-র বিশ্লেষণ এবং আঁদ্রাদ-এর পরীক্ষা-নিরীক্ষা বিশেষ উল্লেখযোগ্য। এইসব জটিল তত্ত্বে আলোকসম্পাত করা—Kundt-নলে পরীক্ষণের বাড়তি অবদান।

আঁদ্রাদ-এর পরীক্ষায়, নলে স্পন্দক-হিসাবে টেলিফোন-গ্রাহকের পর্দা ব্যবহৃত হয় ; স্পন্দনী-ভাল্‌ভ-বর্তনী থেকে উৎপাদিত বিশুদ্ধ সাইনীয় তরঙ্গরূপের প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা তাকে স্পন্দিত করে। এই প্রবাহের প্রাবল্য, কম্পাংক এবং দশা ইচ্ছামতো পাল্টানো সম্ভব। জোরালো বিদ্যুৎ-ধারা যখন নলের বায়ুস্তম্ভের সমকম্পাংক, তখন প্রবল অনুনাদী স্পন্দন হয়। স্পন্দন-সন্ধানী হিসেবে তামাকের ধোঁয়া ব্যবহৃত হয়েছিল ; বায়ুতে খুব সূক্ষ্ম তামাক-কণা নিলম্বিত (suspended) থাকে—আর বিক্ষিপ্ত আলোয় এই কণাগুলিকে পর্যবেক্ষণ করা এবং আলোকচিত্র নেওয়া হয়। এই পরীক্ষায় প্রমাণিত হয়েছে যে, নলের মধ্যে খুবই জটিল সব ব্যাপার ঘটে। প্রতিষ্ঠিত ঘটনাগুলি হচ্ছে—

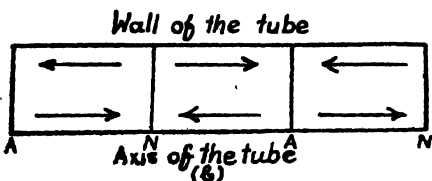
(১) বিলেখরেখাগুলি খুবই খর এবং সুস্পন্দবিন্দুতে কণাগুলি খুব সূক্ষ্ম বা তীক্ষ্ণ চক্রাকারে নলের গা জুড়ে সজ্জিত হয়; তাদের **সুস্পন্দচক্র** বলে। তীক্ষ্ণতার কারণে এদের মধ্যে ব্যবধান 0.01% পর্যন্ত সূক্ষ্মতায় মাপা সম্ভব। কণার ঢিবিদের মধ্যে ব্যবধান এই সূক্ষ্মতায় মাপা অসম্ভব বলেই তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপনে দুই ক্রমিক সুস্পন্দচক্রের ব্যবধান ($\frac{1}{2}\lambda$) নেওয়াই রীতি।

(২) কণাগুলির স্পন্দনবিস্তার তাদের আয়তনের ব্যস্তানুপাতে এক নির্দিষ্ট উর্ধ্ব-মান পর্যন্ত বাড়ে; এই সীমান্তমানকে শাব্দক্ষেত্রে বায়ুকণার সরণবিস্তার ব'লে ধরা হয়।

চিত্র 14.13(*a*)—কুণ্ড-নলে বায়ুকণার-সঞ্চারণ

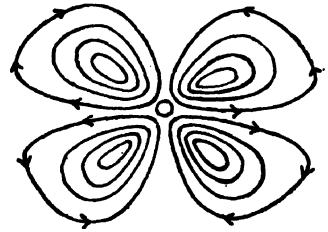
(৩) তাত্ত্বিক আলোচনা থেকে র‍্যালে সিদ্ধান্ত করেছিলেন যে, নলের অক্ষ থেকে দেয়ালের মধ্যে কণাগুলির সঞ্চারণ (circulation) হবে; আন্দ্রাদের পরীক্ষায় এই সিদ্ধান্ত সমর্থিত হয়েছে। র‍্যালে সঞ্চারণের যে সূত্রটি দিয়েছিলেন, সেটি হ'ল

$$\phi = A(r^4 - r^2R^2) \sin \beta x$$

এতে ϕ বেগ-বিভব, R নলের ব্যাসার্ধ, A এক সাংখ্যধ্রুবক, আর r নলের অক্ষ থেকে কোন কণার দূরত্ব, x তার স্থানাংক এবং β তরঙ্গধ্রুবক।

চিত্র 14.13(*b*)—সঞ্চারিত কণার গতিপথ

14.13(*a*) চিত্রে বাঁ-দিকে কণাগুলির গণনালব্ধ এবং ডানদিকে পরীক্ষায় পাওয়া সঞ্চারপথ দেখানো হয়েছে—দুয়ের নিকট-সাদৃশ্য লক্ষণীয়। 14.13(*b*) চিত্রে কণাদের গতিমুখ নির্দেশিত—দেয়ালের কাছে নিস্পন্দ থেকে সুস্পন্দবিন্দুর দিকে, অক্ষ বরাবর বিপরীতমুখে।

(৪) নলের অক্ষে বড় কণিকা থাকলে, তার সঞ্চারণ সম্ভব হয় না ; তাকে কেন্দ্র ক'রে বড় বড় ঘূর্ণাবর্তের উদ্ভব হয় (চিত্র 14.13*c*)। এদের আচরণ পর্যবেক্ষণ ক'রে চলপ্রবাহী তত্ত্বের নানা সমস্যার সমাধান সম্ভব হয়েছে। যেমন আগে ধারণা ছিল যে, স্পন্দনশীল বায়ুস্তম্ভে দুটি গোলক থাকলে, তাদের মধ্যে অঘূর্ণজনিত আকর্ষণী বা বিকর্ষণী বলের উদ্ভব হয়। কিন্তু এই পরীক্ষায় সাব্যস্ত হয়েছে যে সেই বল আবর্তজনিত।

Kundt-নলের সমস্ত ঘটনাই এখন আবর্তগতি এবং বায়ুকণার সঞ্চারণ দিয়ে ব্যাখ্যা করা হয়। দুটি কণা কাছাকাছি এলে তাদের বেষ্টনী-আবর্তমালা পরস্পর মিলে যেতে সুরু করে এবং তখনই কণা-দুটি নলের অক্ষের আড়াআড়ি দিকে সজ্জিত হয় এবং তাদের ঘিরেই সম্মিলিত ঘূর্ণি-সংস্থা 14.13(*c*) চিত্রের আকারে দেখা দেয়। অনেকগুলি এইরকম কণাযুগ্ম যখনই পাশাপাশি এসে জোটে তখনই বিলেখের উৎপত্তি হয়। নিস্পন্দ থেকে সুস্পন্দবিন্দু পর্যন্ত তাদের ব্যবধান ক্রমশই বদ্‌লাতে থাকে ; পরপর দুই বিলেখের ঘূর্ণিমালা পরস্পরকে ছুঁয়ে থাকে। শব্দতীব্রতা, কণার আয়তন, গ্যাসের চাপ এবং কণাসংখ্যার ওপর বিলেখ-ব্যবধান নির্ভর করে।

চিত্র 14.13(*c*)—স্থিরকণাকেন্দ্রিক ঘূর্ণাবর্ত-সংস্থা

১৪-১০. শংকু-নলে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন :

সরল বেলনাকার নলের সর্বত্রই প্রস্থচ্ছেদ সমান ; শংকু-নলে প্রস্থচ্ছেদ শীর্ষ থেকে ভূমির দিকে ক্রমশই সমহারে বেড়ে চলে। তাই বেলন-নল বরাবর তরঙ্গরূপ সমতলীয় এবং কণা-সরণ অক্ষীয় হয়, আর শংকুতে গোলীয় তরঙ্গ অপসারী বা অভিসারী হবে এবং কণাসরণ তার ব্যাস-বরাবর হতে বাধ্য থাকে। এক্ষেত্রেও বায়ুস্তম্ভে স্থাণুতরঙ্গের এক নিস্পন্দবিন্দু শংকুশীর্ষে আর এক সুস্পন্দবিন্দু শংকুভূমির কিছুটা বাইরে হবে। এই শংকুভূমি খোলা বা মুক্ত প্রান্ত ; সেটি বন্ধমুখ হলে কোন কাজেই লাগে না। শংকু-নলে উপসুর উৎপন্ন হলে, অন্তর্বর্তী সুস্পন্দ ও নিস্পন্দবিন্দুগুলি আর বেলনের মতো সমব্যবধানে হবে না, অর্থাৎ উপসুরগুলি বিষমমেল হবে।

শংকুমধ্যে তরঙ্গ গোলীয় রূপ হয় ব'লে, আমরা তরঙ্গ-সমীকরণের ধ্রুবীয় রূপ ব্যবহার করব ; অর্থাৎ ৭-১০.৫ অনুসারে,

$$\frac{\partial^2 (rs)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (rs)}{\partial x^2} \qquad (১৪\text{-}১০.১)$$

এখানে r, শীর্ষবিন্দুকে কেন্দ্র ধ'রে নিয়ে তরঙ্গব্যাসার্ধ এবং s মাধ্যমের সংকোচন-মাত্রা। তরঙ্গ সরল দোলজাতীয় হলে, সমীকরণগুলি হবে

$$rs = A' \cos(\omega t - \phi) \text{ এবং } \frac{\partial^2}{\partial t^2}(rs) + \frac{\omega^2}{c^2}(rs) = 0 \qquad (১৪\text{-}১০.২)$$

প্রথমটি তরঙ্গপ্রাচলের, দ্বিতীয়টি অবকল সমীকরণের প্রাসঙ্গিক রূপ। আগের আগের মতো চলক-বিশ্লেষণ পদ্ধতিতে অবকল সমীকরণের সমাধান করলে, পাব

$$rs = (A_1 \cos \omega r/c + B_1 \sin \omega r/c)(C_1 \cos \omega t + D_1 \sin \omega t)$$
$$= (A \cos \omega r/c + B \sin \omega r/c) \cos(\omega t - \phi) \qquad (১৪\text{-}১০.৩)$$

মুক্ত শংকুতে বায়ুস্পন্দন : আগেই বলেছি যে, শংকুর ভূমি খোলা থাকলে, তাকে মুক্ত শংকু বলে। শংকু-মাত্রেরই শীর্ষবিন্দুতে $r=0$, সুতরাং সেখানে তরঙ্গপ্রাচল $rs=0$; তাই সে-মুখ খোলা কি বন্ধ, সে প্রশ্ন অবান্তর। তাই (১) **শীর্ষবিন্দুতে সব সময়েই** $(rs)_{r=0} = A \cos(\omega t - \phi) = 0$

এখন $\because$ $t \neq 0$, আমাদের ধরে নিতে হবে যে, $A=0$ হবে।

আবার (২) **খোলা ভূমিপ্রান্তে বায়ুচাপ সবসময়েই স্বাভাবিক,** সুতরাং সেখানে s সদাই শূন্য। শীর্ষ থেকে শংকু-বাহুর দৈর্ঘ্য-দূরত্ব l ধরলে, দাঁড়াচ্ছে $(rs)_{r=l}=0$ অর্থাৎ ১৪-১০.৩ থেকে আসবে

$$B \sin(\omega l/c) \cos(\omega t - \phi) = 0$$

এখন $\because$ $t \neq 0$ এবং $B \neq 0$ (কেননা, A, B দুইই শূন্য হলে এই সমীকরণই থাকবে না), কাজেই দাঁড়াচ্ছে

$$\sin(\omega l/c) = 0 \quad \text{অর্থাৎ} \quad \omega l/c = m\pi$$

$$\text{এবং} \qquad n_m = \omega/2\pi = mc/2l \qquad (১৪\text{-}১০.৪)$$

অর্থাৎ খোলা বেলন-নলের মতোই খোলা শংকু-নলেও সম্পূর্ণ সমমেলশ্রেণী থাকে।

ব্যবহারিক প্রয়োগ : শংকু-চোঙার সাহায্যে ফেরিওলাদের দিঙ্‌মুখী শব্দ বাড়ানোর চেষ্টা তোমরা সকলেই দেখেছ। মুক্ত বায়ুতে বক্তৃতা করতে বা কুয়াশার মধ্যে কোন একদিকে শব্দসংকেত পাঠাতে এইরকম চোঙা বা **মেগাফোনের** (mega = বর্ধিত, phone = শব্দ) ব্যবহার বহুল।

স্বনক মেগাফোন-শীর্ষে থাকে। বাঞ্ছিত অভিমুখে এর সাহায্যে জোরালো শব্দ পাঠাতে হলে, তার ভূমিব্যাস তরঙ্গদৈর্ঘ্যের চেয়ে অনেক ছোট হওয়া চাই। নামেই বোঝা যাচ্ছে যে, শব্দকে দিঙ্‌মুখী করার চেয়ে মেগাফোনের শব্দবর্ধন-ক্ষমতাই বেশী। আবার আপতিত শব্দতরঙ্গ সংহত করাতেও এর সার্থক ভূমিকা আছে। মাইক্রোফোন বা শব্দমুদ্রক-যন্ত্র-মাত্রেরই শংকু-আকারের সংগ্রাহক থাকে।

ভূমিবদ্ধ শংকুতে উৎপন্ন মূল-সুরের কম্পাংক $1.43c/2l$ এবং উপসুরগুলি বিষমমেল হয়। এদের ব্যবহারিক প্রয়োগ নেই।

১৪-১১. শিঙায় বায়ুস্তম্ভের স্পন্দন :

যে দু'মুখ-খোলা নলের একপ্রান্ত থেকে অন্যপ্রান্তের দিকে প্রস্থচ্ছেদের ব্যাস কোনএক নির্দিষ্ট গাণিতীয় সূত্রানুসারে বেড়েই চলে, তাকে শিঙা (horns) বলে।

এপর্যন্ত আমরা যে **সরল মুক্ত-শংকু** আলোচনা করলাম, সে এক ধরনের শিঙাই। এতে শীর্ষবিন্দু থেকে x_0 দূরে প্রস্থচ্ছেদ S_0, এবং x দূরে প্রস্থচ্ছেদ S ধরলে, প্রস্থচ্ছেদ বাড়ার সূত্র হচ্ছে $S_x/S_0=(1+x/x_0)^2=(\frac{1}{2}m)^2$.

আরও দু'রকম শিঙা উচ্চমানের হওয়ায় তাদের ব্যবহার বহুল—তারা যথাক্রমে **সূচকীয়** ($S_x/S_0=e^{mx}$) এবং **ক্যাটেনয়েড** ($S_x/S_0=\cosh^2 \frac{1}{2}mx$) ; এদের ক্ষেত্রে m রাশিটি (scale factor) প্রস্থচ্ছেদের বৃদ্ধিহার নির্দেশ করে।

14.14 চিত্রে তিন রকমের শিঙাই দেখানো হয়েছে।

চিত্র 14.14—প্রচলিত শিঙার আকার

শিঙার মধ্যে দিয়ে শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তি তিনটি সর্তাধীনে ঘটে—(১) যেকোন নির্দিষ্ট প্রস্থচ্ছেদের প্রতিটি বিন্দুতেই কণাসরণ সমান ; (২) এই কণাসরণের মান অল্প ; (৩) তরঙ্গদৈর্ঘ্য শিঙার ভূমি-ব্যাসের চেয়ে অনেক বড়।

শিঙার মধ্যে বায়ুস্পন্দনের অবকল সমীকরণ ঃ জটিল তরঙ্গমালার অবকল সমীকরণের ব্যুৎপাত্তিকরণের সময় (§৭-৮) যে তিনটি ধাপে এগোনো হয়েছিল—সন্ততি-সমীকরণ নির্ণয়, স্থিতিস্থাপক সম্পর্কের প্রয়োগ এবং নির্দিষ্ট তরঙ্গপ্রাচলের পরিপ্রেক্ষিতে সমীকরণের উপস্থাপনা—এখানেও সেইভাবেই চলা হবে।

ধরা যাক, শীর্ষবিন্দু বা যেকোন স্বৈচ্ছিক মূলবিন্দু থেকে x দূরত্বে, শিঙার প্রস্থচ্ছেদের মাপ S এবং তা থেকে δx ব্যবধানে S' মাপের দ্বিতীয় প্রস্থচ্ছেদ। স্পন্দনের ধাক্কায় প্রথম প্রস্থচ্ছেদ দিয়ে এই আয়তনাংশে প্রবিষ্ট বায়ুর ভর $S\rho\dot{\xi}.\delta t$ এবং দ্বিতীয় প্রস্থচ্ছেদ থেকে নির্গত বায়ুর ভর নিশ্চয়

$$-\frac{\partial}{\partial x}(S\rho\dot{\xi}.\delta t)\ \delta x$$

হবে। সুতরাং এই আয়তনাংশের মধ্যে ভরের পরিবর্তনের মান হবে

$$\frac{\partial}{\partial t}(m.\delta t)=\frac{\partial}{\partial t}(\rho S\ \delta x)\ \delta t=-\frac{\partial}{\partial x}(\rho S\dot{\xi}.\delta t)\ \delta x$$

$$\therefore\quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho S)+\frac{\partial}{\partial x}(S\rho\dot{\xi})=0\quad [\because\quad \delta x\neq 0,\ \delta t\neq 0]$$

বা $$S\frac{\partial \rho}{\partial t}+\rho\frac{\partial S}{\partial t}+\rho\dot{\xi}\frac{\partial S}{\partial x}+S\frac{\partial}{\partial x}(\rho\dot{\xi})=0 \qquad (১৪\text{-}১১.১)$$

[দ্বিতীয় রাশিটি শূন্য, কারণ ভৌতবিচারে এটি অর্থহীন রাশি]

এইটিই প্রয়োজনীয় সন্ততি-সমীকরণ। এবারে তাতে $\rho=\rho_0(1+s)$ স্থিতিস্থাপক সম্পর্কটি বসালে, পাব

$$\rho_0 S\ \frac{\partial s}{\partial t}+\rho_0\dot{\xi}\ \frac{\partial S}{\partial x}+\rho_0 s\dot{\xi}\frac{\partial s}{\partial x}+\rho_0 S\frac{\partial \dot{\xi}}{\partial x}+\rho_0 S\frac{\partial}{\partial x}(s\dot{\xi})=0$$

$$\left[\because\ \dot{\rho}=\rho_0\dot{s}\ \frac{d\rho}{dx}=\rho_0\frac{ds}{dx}\right]$$

বা $$S\frac{\partial s}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(S\dot{\xi})=0\ [\because\ \rho_0\neq 0,\ \dot{\xi}\neq 0 \text{ এবং } s\dot{\xi} \text{ রাশিটি নগণ্য}]$$

বা $$\dot{s}=-\frac{1}{S}\frac{\partial}{\partial x}(S\dot{\xi})$$

এখন বেগ-বিভব ψ তরঙ্গপ্রাচল হিসাবে ধরলে, ৭-৯.৪ এবং ৭-৯.১ থেকে লেখা যায় ঃ

$$\dot{\psi}=c^2 s \quad \text{এবং} \quad \dot{\xi}=-\partial\psi/\partial x$$

$$\therefore \quad \ddot{\psi} = c^2 \dot{s} = \frac{c^2}{S} \cdot \frac{\partial}{\partial x}\left(S \frac{\partial \psi}{\partial x}\right)$$

$$= c^2\left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x}(\log S)\right] \qquad (১৪\text{-}১১.২)$$

১৪-১১.২ সমীকরণটি যেকোন রকমের বায়ুস্তম্ভে স্পন্দনের অবকল সমীকরণ। স্পন্দনশীল স্তরের অবস্থান (x) এবং সংকোচনের (s) পারস্পরিক সম্পর্কের ওপর এই অবকল সমীকরণের সমাধান নির্ভর করে।

ক. বেলন (Cylindrical) **নল :** এখানে প্রস্থচ্ছেদ (S) সর্বত্রই সমান। সুতরাং

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \qquad (১৪\text{-}১১.৩)$$

লব্ধ সমীকরণটি সমতলীয় তরঙ্গ নির্দেশ করে। লক্ষণীয় যে, আগে বেলন-নলে শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তি আলোচনাকালে তাকে সমতলীয়ই ধরা হয়েছে। এইজাতীয় নলে শব্দতরঙ্গের সংহতি এবং দিঙ্‌মুখিতা (directivity) কিছুটা পাওয়া সম্ভব।

খ. শংকু (Conical)-**নল :** এখানে শীর্ষ থেকে x দূরত্বে নলের প্রস্থচ্ছেদ $S_x = S_0\ (1 + x/x_0)^2$; সুতরাং

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \frac{c^2}{S_x} \frac{\partial}{\partial x}\left(S_0 \frac{\partial \psi}{\partial x}\right)$$

$$= \frac{c^2}{(1 + x/x_0)^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{\partial \psi}{\partial x}\right]$$

$$= \frac{c^2}{r^2} \frac{\partial}{\partial x}\left[r_0^{\,2} \frac{\partial \psi}{\partial x}\right] \qquad (১৪\text{-}১১.৪)$$

(এখানে, $r = x + x_0 =$ শংকুশীর্ষ থেকে S-এর দূরত্ব)। এটি একমাত্রিক গোলীয় তরঙ্গের সমীকরণ। এই ভিত্তিতেই শংকু-নলে শব্দতরঙ্গের ব্যাপ্তি আলোচিত হয়েছে। বেগ-বিভবের (ψ) বদলে শাব্দচাপও (p) বসানো যায়। তখন অপসারী বহির্গামী তরঙ্গের সমীকরণ দাঁড়াবে

$$p = (P/r)e^{j(\omega t - \beta x)}$$

এখন শংকুর সরু মুখে (S_0) স্বনক থাকলে, A যদি তার শাব্দতীব্রতা হয় তাহলে দেখান যায় যে বিকিরিত ক্ষমতা (P_e) এবং শক্তি-প্রেরণ-গুণাংক (τ_0) যথাক্রমে হবে

$$P_e = \left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)_0 = \frac{1}{2}\frac{\rho c A^2}{S_0 S'}\frac{(\beta x_0)^2}{1+(\beta x_0)^2}$$

[S' এখানে ভূমির প্রস্থচ্ছেদ]

এবং $$\tau_0 = \frac{(\omega x_0{}^2)^2}{(c^2+\omega_0 x_0{}^2)^2}$$

গ. **সূচক** (Exponential)-**শিঙা :** এক্ষেত্রে দুই প্রস্থচ্ছেদের মধ্যে সম্পর্ক $S = S_0 e^{mx}$; অতএব $\frac{\partial}{\partial x}(\log S) = m$

এবং $$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c^2\left(m\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}\right)$$

শিঙার মধ্যে সচল তরঙ্গ সরল দোলজাতীয় হলে, $\ddot{\psi} = -\omega^2\psi$ হয়। সেই মান ওপরের সমীকরণে বসালে, পাওয়া যাবে

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + m\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2}\psi = 0 \qquad (১৪\text{-}১১.৫)$$

এর পরখ-সমাধান (মন্দিত দোলনের সমীকরণের অনুকরণে) যদি $\psi = Ae^{px}$ ধরা যায়, A এবং p দুই নির্ণেয় সমাকলন ধ্রুবক হবে। তাহলে

$\frac{\partial \psi}{\partial x} = p\psi,\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = p^2\psi$ এবং $(p^2 + mp + \omega^2/c^2)\psi = 0$ পাব।

$$\therefore\quad p^2 + mp + \omega^2/c^2 = 0 \quad (\because\ \psi \neq 0) \qquad (১৪\text{-}১১.৬)$$

তাহলে স্পন্দন হতে পারে দুটি সর্তাধীনে—

(১) $\omega^2/c^2 > m^2/4$ এবং (২) $\omega^2/c^2 = m^2/4$;

এই এই সর্তাধীনে p-র মান আমরা এবারে আলোচনা করি—

(১) $\omega/c > \frac{1}{2}m$ হলে $p = \frac{1}{2}(-m \pm j\sqrt{(4\omega^2/c^2) - m^2}$

$$= -\alpha \pm j\beta$$

$$\therefore\quad \psi = A_1 e^{p_1 x} + A_2 e^{p_2 x} = e^{-\alpha x}(A_1 e^{j\beta x} + A_2 e^{-j\beta x})$$

যেহেতু বেগ-বিভব (ψ) এখানে তরঙ্গপ্রাচল, অর্থাৎ দেশ (x) এবং কাল (t) দুয়েরই ফলন, তাই আমরা লিখতে পারি

$$\psi=(A_1e^{j\beta x}+A_2e^{-j\beta x})e^{-\alpha x}.\,e^{j\omega t}$$
$$=e^{-\alpha x}\left[A_1\cos(\omega t+\beta x)+A_2\cos(\omega t-\beta x)\right]$$

শিঙার ভূমির প্রস্থচ্ছেদ S' যদি শীর্ষছেদ S_0 সাপেক্ষে যথেষ্ট বড় হয়, তাহলে প্রতিফলন সামান্যই হয় ; সুতরাং বন্ধনীর মধ্যে প্রথম রাশিটি, যেটি প্রতিফলিত বিষমমুখী তরঙ্গ, সেটি নগণ্য হয়ে গিয়ে সমীকরণ হয়ে দাঁড়ায়

$$\psi=A_2e^{-\alpha x}\cos(\omega t-\beta x) \qquad (১৪\text{-}১১.৭)$$

এখানে ক্ষয় $e^{-\alpha x}$ কিন্তু দমনজনিত নয়, m ($=2\alpha$, scale factor) রাশিটির জন্যই আসে। সুতরাং প্রস্থচ্ছেদ (S) যত বাড়বে ক্ষয়ও ততই বাড়বে।

(২) $\omega/c=\frac{1}{2}m$ হলে $\omega=\frac{1}{2}mc$ এবং $n_e=mc/4\pi$ হয় ; এই n_e নিম্নতম সম্ভবপর বা ক্রান্তিক কম্পাংক। উচ্চতর উপসুরগুলির কম্পাংকমান শিঙার স্কেল-গুণাংক, অর্থাৎ তার প্রস্থচ্ছেদ-বৃদ্ধির হার m-এর ওপর, নির্ভর করে। এই ক্রান্তিক কম্পাংককে ছেদ (cut-off) কম্পাংকও বলে।

সূচক-শিঙায় বিকিরিত শক্তি এবং প্রেরণ-গুণাংক যথাক্রমে হবে

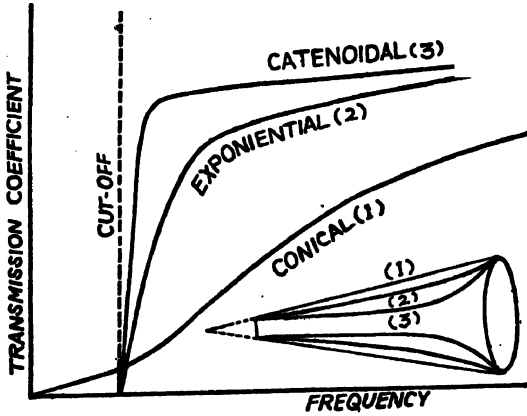
$$P_e=\left(\frac{dW}{dt}\right)_e=\frac{1}{2}\frac{\rho cA^2}{S_0S'}\left(1-\frac{1}{4}\frac{mc^2}{\omega^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

এবং
$$\tau_e=\left[1-\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}=1-\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2$$

ছেদ-কম্পাংক থাকায়, সূচক শিঙা থেকে অল্প-কম্পাংকের সুর বেরোয় না—তারা নিরুদ্ধ (suppressed) হয়ে যায়। তাই এই শিঙাকে উচ্চকম্পাংক (high-pass) ফিল্টারও বলা যায়।

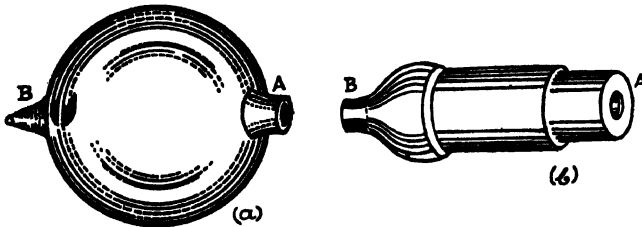
ঘ. Catenoid-শিঙা : এক্ষেত্রে দুই প্রস্থচ্ছেদের মধ্যে সম্পর্ক $S/S_0=\cosh^2\frac{1}{2}mx$ থাকে ; সূচক-শিঙার এবং এর প্রস্থচ্ছেদের আকার শীর্ষ থেকে অনেক দূরে একই রকমের, তাদের ব্যাসের তফাৎ যা হয়, তা শীর্ষের কাছেই। এক্ষেত্রে পাওয়া যায়

$$\psi_x=\frac{\psi_0e^{j(\omega t-\beta x)}}{\cosh^2\frac{1}{2}mx^2} \text{ এবং } \tau_{cat}\simeq1+\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2=1/\tau_e$$

শিঙাগুলির মধ্যে তুলনা : 14.15 চিত্রে তিনরকম শিঙার একই মাপের শীর্ষ এবং ভূমির মধ্যে প্রস্থচ্ছেদের ক্রমবিবর্তন এবং ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে

চিত্র 14.15—শিঙার আকার ও কৃতি-বিচার

প্রেরণ-গুণাংকের মান লেখচিত্রে দেখানো হয়েছে। পরপৃষ্ঠার সারণীতে তাদের ভিন্ন ভিন্ন মাপজোখ এবং কৃতিত্ব তুলনামূলক ভাবে দেখানো হয়েছে।

১৪-১২. অবরুদ্ধপ্রায় বায়ুগহ্বর : হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদক :

যেকোন আকারের ফাঁপা পাত্রে যদি ছোট একটি ফুটো দিয়ে ভেতরের এবং বাইরের বায়ুর যোগাযোগ থাকে, তাকেই **বায়ুগহ্বর** বলা চলে। তার

চিত্র 14.16—হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদক

আকার গোলকের মতো হলে, তাকে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-এর অনুনাদক বলে (৮-৫ অনুচ্ছেদে তার সম্বন্ধে আলোচনা করা হয়েছে)। একে তাপবিদ্যায় কৃষ্ণ-বিকিরকের (Black-body radiator) সঙ্গে তুলনা করা যায়।

তুলনীয় রাশি	বেলন-নল	শংকু-শিঙা	সূচক-শিঙা	ক্যাটেনয়েড-শিঙা
(১) স্কেল-গুণাংক (h) (scale factor)	0	∞	$\frac{1}{2}m$	m
(২) আকার-গুণাংক (shape factor)	0	h/x_0	1	0
(৩) দুই প্রান্তিক প্রস্থচ্ছেদের অনুপাত (S/S_0)	1	$(1+x/x_0)^2=(m/2)^2$	e^{mx}	$\cosh^2 mx/2$
(৪) কণ্ঠে (throat) সংকোচন $(\partial S/\partial x)_{x=0}$	0	সসীম	1	0
(৫) কণ্ঠে S_0 মাপের ছোট নলের সংযোজনে প্রতিফলন	0	নির্দিষ্ট মান	তুলনায় কম	হয় না (মস্ত সুবিধা)
(৬) প্রেরিত কম্পাংক	সমগ্র শ্রেণী	সমগ্র শ্রেণী	ক্রান্তিক কম্পাংকের উর্ধ্বে	এখানেও তাই, তবে ক্রান্তিক কম্পাংক বেশী
(৭) বিকিরণ-ক্ষমতা (14.15 চিত্র)	অল্প ; অনুনাদ বা শব্দ-বিবর্ধন ক্ষমতাই বেশী	মোটামুটি কমই ; কম্পাংক বাড়ার সঙ্গে আস্তে আস্তে বাড়ে	ছেদ-কম্পাংকের উর্ধ্বে দ্রুত-হারে বাড়ে, পরে বৃদ্ধিহার খুব ধীরে	ছেদ-কম্পাংকের উর্ধ্বে খুব দ্রুত বাড়ে, পরে প্রায় সমান থাকে।
(৮) বিকিরণ-কৃতি (efficiency)	সামান্য	কিছুটা বেশী	নিম্নকম্পাংকে শংকুর চেয়ে অনেক বেশী, ক্যাটেনয়েড থেকে কম। বেশী কম্পাংকে শংকুর চেয়ে অনেক বেশী, ক্যাটেনয়েডের চেয়ে সামান্য কম	বিকিরক হিসাবে সবচেয়ে দক্ষ

সাধারণত ব্যবহৃত যন্ত্রটি (চিত্র 14.16a) একটি ধাতু বা কাচের ফাঁপা গোলক ; তার একদিকে একটি মোটা, বেঁটে ও ফাঁপা বেলনাকার কণ্ঠ (A), আর ঠিক উল্টোদিকে সরু, বেঁটে শংকু-নলের (B) মুখে ছোট একটি ফুটো—রবারের নল দিয়ে এই নলটিকে কান বা অন্য শব্দগ্রাহীর সঙ্গে যোগ করা যায়। A নলে বায়ুর আয়তন, অনুনাদক গহ্বরে আবদ্ধ বায়ুর আয়তনের তুলনায় অনেক কম। গহ্বরের আকার গুরুত্ববিহীন ; গোলাকার বা বেলনাকার দুইই হতে পারে। A নলটি শব্দগ্রাহী ; সেখানে সংকোচন-তরঙ্গ পড়লে তার মধ্যের বায়ুস্তরটুকু ব্যতিহারী পিস্টনের মতো এগিয়ে-পেছিয়ে গহ্বরের বায়ুভরকে পর্যায়ক্রমে সংকুচিত ও প্রসারিত করতে থাকে।

এই গোলাকার বায়ুগহ্বর, বেলন বা শংকুর মতোই বিশেষ শ্রেণীর অনুনাদক। কিন্তু তাদের তুলনায় অনুনাদক হিসাবে এটি অনেক বেশী দক্ষ। কেননা এখানে বায়ু অবরুদ্ধপ্রায়, তার স্পন্দনশক্তির সামান্যই বিকিরিত বা প্রেরিত হতে পারে (বেলনের প্রেরণক্ষমতা এর তুলনায় বেশী, শংকুর আরও বেশী)। ফলে, এতে শক্তিক্ষয় অল্পই হয়, কাজেই অনুনাদ-খরতা বা সুরবন্ধন প্রখর। বাইরের ও ভেতরের বায়ুর মধ্যে যান্ত্রিক-যোজন খুব কম থাকে ব'লেই এর বিকিরণক্ষমতা দুর্বল। শব্দসন্ধানী এবং সুরবিশ্লেষক হিসাবে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদক বিশেষরকম কৃতী। এই কৃতিত্ব বাড়াতে যে সর্তগুলি পালনীয়, তারা হ'ল—

(১) বায়ুগহ্বরের আয়তন কণ্ঠের আয়তনের চেয়ে অনেক বেশী ;

(২) আপতিত তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনুনাদকের দৈর্ঘ্যের চেয়ে অনেক বড়—তাতে গহ্বরের সর্বত্র সংকোচন সুষম ; এবং

(৩) আপতিত সংকোচন-তরঙ্গের ক্রিয়ায় কণ্ঠবায়ুর সরণ স্বল্পমান।

৮-৫ অনুচ্ছেদে আমরা (ক) কণ্ঠবায়ুর স্পন্দনকে ভরপীড়িত স্পন্দনের সঙ্গে তুলিত ক'রে এবং (খ) শাব্দ-যন্ত্র-বৈদ্যুত উপমিতির দৃষ্টিকোণ থেকে হেল্‌ম্‌হোলৎজ-অনুনাদককে জাড্য-ধারকত্বের শ্রেণী-সমবায় ব'লে ধরে নিয়ে কম্পাংক বার করেছি। এবারে কণ্ঠবায়ুকে **ভর** (জড়তা-ধর্ম) এবং গহ্বর-বায়ুকে **স্প্রিং** (প্রত্যানয়ক-ধর্ম) ব'লে গণ্য ক'রে এই অনুনাদকের স্ববশ ও পরবশ দু'রকম কম্প্যাংকই বার ক'রবো।

স্ববশ কম্পন ঃ অনুনাদকের কণ্ঠে বায়ুস্তম্ভের প্রান্তিক ত্রুটিসহ দৈর্ঘ্য, অর্থাৎ

কার্যকর দৈর্ঘ্য l, তার প্রস্থচ্ছেদ S, অনুনাদকের আয়তন V এবং কণ্ঠের বায়ুতে তরঙ্গবেগ c হলে, ৮-৫.৪ সমীকরণ থেকে কম্পাংক আসে

$$n=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV}}$$

যদি গহ্বরের ভেতরের বায়ুর ঘনত্ব এবং আয়তনাংক যথাক্রমে ρ এবং K, আর আপতিত সংকোচন-তরঙ্গে শাব্দচাপ p ধরি, তবে $K=\dfrac{p}{-\delta V/V}$ এবং কণ্ঠবায়ু-পিস্টনের ওপর অন্তর্মুখী বল হয়

$$pS=KS\,(-\delta V/V)=-S^2K\xi/V$$

এখানে, কণ্ঠবায়ুর সরণ ξ এবং $\delta V=S\xi$ ধরা হচ্ছে। অন্তর্মুখী বলকে জড়তা-বলের সমান ধরলে,

$$pS=mf \text{ বা } -\frac{S^2K\xi}{V}=\rho Sl\left(-\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2}\right) \qquad (১৪\text{-}১২.১)$$

সুতরাং কম্পাংক হবে

$$n=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\text{প্রত্যানয়ক-গুণাংক}}{\text{জড়তা-গুণাংক}}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{S^2K/V}{\rho Sl}}$$

$$=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV}\cdot\frac{K}{\rho}}=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV}}=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\kappa}{V}} \qquad (১৪\text{-}১২.২)$$

এখানে, $S/l=\kappa$ রাশিটিকে শাব্দ-পরিবাহিতাংক (conductivity) ধরা হয়েছে। বোঝাই যাচ্ছে যে, κ দৈর্ঘ্য-মাত্রক রাশি এবং অনুনাদক-মাত্রেরই মূল কম্পাংক তার নিজস্ব মাপজোখ (l, S, V) দিয়ে নিয়ন্ত্রিত হয়।

এখন কণ্ঠের কার্যকর দৈর্ঘ্য $(l)=$ কণ্ঠদৈর্ঘ্য $(l')+$ দুই খোলা মুখের প্রান্তিক ত্রুটি $(2e)$। কণ্ঠের ব্যাস d ধরলে, $2e=4d/3\pi$ আসে। সুতরাং

$$n=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi d^2}{4V(l'+4d/3\pi)}}=\frac{cd}{4}\sqrt{\frac{3/V}{(3\pi l'+4d)}} \qquad (১৪\text{-}১২.৩)$$

অর্থাৎ অনুনাদকের কম্পাংক তার আয়তনের বর্গের ব্যস্তানুপাতে এবং কণ্ঠব্যাসের সমানুপাতে বদলায়।

পরবশ কম্পন : ধরা যাক, আপতিত সংকোচন-তরঙ্গ কণ্ঠবায়ুর ওপর $p=Pe^{j\omega t}$ পরিমাণ শাব্দচাপ প্রয়োগ করছে। এই চাপ খানিকটা বায়ুকে ঠেলে গহ্বরে ঢুকিয়ে দিচ্ছে এবং সেখানে বায়ুঘনত্ব বাড়াচ্ছে। গহ্বরপ্রবিষ্ট বায়ুর ভর $S\xi\rho$, ঘনত্ব-বৃদ্ধির মান $\delta\rho=\rho S\xi/V$ এবং উৎপন্ন সংকোচন-মাত্রা

$$s=\delta\rho/\rho=S\xi/V \text{ এবং বর্ধিত চাপ } p_i=Ks=c^2\rho s$$

কাজেই কণ্ঠে সক্রিয় কার্যকরী চাপ $(p-p_i)$ এবং কার্যকরী বল $S(p-p_i)$ হবে। ধরা যাক, কণ্ঠবায়ুর স্পন্দনে সক্রিয় অবদমন-বল $R'\dot{\xi}$; তাহলে এই বায়ুভরের স্পন্দনের অবকল সমীকরণ পাব

$$\rho lS\ddot{\xi}+R'\dot{\xi}=S(p-p_i)=pS-S\rho c^2 s$$

বা $$\rho lS\ddot{\xi}+R'\dot{\xi}+\rho c^2(S^2/V)\,\xi=pS \qquad (১৪\text{-}১২.৪)$$

$$[\because\ s=S\xi/V]$$

এখন র‍্যালের গণনানুসারে, $R'=\rho\omega S^2/\lambda$; আর $X=S\xi$ (আয়তন-সরণ) ধরলে, সমীকরণটি দাঁড়ায়

$$\rho lS\frac{\ddot{X}}{S}+\frac{\rho\omega S^2}{\lambda}\cdot\frac{\dot{X}}{S}+\rho c^2\frac{S}{V}X=pS$$

বা $$\frac{\rho l}{S}\ddot{X}+\frac{\rho\omega}{\lambda}\dot{X}+(\rho c^2/V)X=p=Pe^{j\omega t} \qquad (১৪\text{-}১২.৫)$$

এবারে এই পরবশ স্পন্দনের পরথ-সমাধান $X=Ae^{j\omega t}$ ধরলে, $\dot{X}=j\omega X$, $\ddot{X}=j\omega\dot{X}$ এবং $X=\dot{X}/j\omega$ পাই। এই মানগুলিকে আগের সমীকরণে বসালে, পাওয়া যাবে

$$\dot{X}\left(j\omega\frac{\rho l}{S}+\frac{\rho\omega}{\lambda}+\frac{\rho c^2}{j\omega V}\right)=Pe^{j\omega t}$$

$$\dot{X}=\frac{Pe^{j\omega t}}{\rho\omega/\lambda+j\rho\left(\frac{\omega l}{S}-\frac{c^2}{\omega V}\right)} \qquad (১৪\text{-}১২.৬)$$

এখানে, শাব্দবাধ $$Z_a=\frac{Pe^{j\omega t}}{\dot{X}}=\frac{Pe^{j\omega t}}{S\dot{\xi}}=\frac{p}{U}=\frac{\rho\omega}{\lambda}+j\rho\left(\frac{\omega l}{S}-\frac{c^2}{\omega V}\right)$$

(১৪-১২.৭)

অতএব শাব্দরোধ $R_a = \rho\omega/\lambda$

এবং শাব্দ-প্রতিক্রিয়তা $X_a = \rho\left(\frac{\omega l}{S} - \frac{c^2}{\omega V}\right)$ (১৪-১২.৮)

অনুনাদ ঘটলে, শাব্দ-প্রতিক্রিয়তা শূন্য হতে হবে। সুতরাং

$$\omega l/S = c^2/\omega V \quad \text{বা} \quad \omega = c\sqrt{S/lV}$$

বা $$n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{S/lV}$$ (১৪-১২.৯)

কাজেই অনুনাদী কম্পাংক অনুনাদকের স্বকীয় কম্পাংকের সমানই হয়। দমন-গুণাংক $\rho\omega/\lambda$ হওয়ায় স্পন্দনের মন্দন-হার হবে $e^{-\rho\omega/2\lambda}$ এবং দেখানো যায় যে, $\rho\omega/\lambda = 8\pi V/\kappa^2 c$; সুতরাং বলা যায় যে, অনুনাদকে স্পন্দনের ক্ষয়হার তার আয়তনের সমানুপাতিক এবং কণ্ঠপ্রস্থচ্ছেদের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক (র‍্যালে-র গণনানুসারে বৃত্তাকার ছিদ্রের ক্ষেত্রে $\kappa = d$) হয়। কাজেই বড় অনুনাদকের কণ্ঠব্যাস ছোট হলে—তার (১) স্বকীয় কম্পাংক কম, (২) ক্ষয়হার কম, (৩) শক্তিবিকিরণ অল্প—(৪) সুতরাং স্পন্দন দীর্ঘস্থায়ী হয়।

বায়ুনল এবং বায়ুগহ্বরের স্পন্দনের মধ্যে তুলনা : (১) নলের ক্ষেত্রে ভেতরের ও বাইরের বায়ুর মধ্যে সংযোজনমাত্রা তুলনায় জোরালো, সুতরাং শক্তিবিকিরণ বেশী ; গহ্বরে ঠিক উল্টো। সুতরাং নলের প্রধান ব্যবহার —স্বনক হিসেবে, আর অনুনাদকের ব্যবহার—দুর্বল শব্দের গ্রাহক বা সন্ধানী হিসেবে। (২) নলের দৈর্ঘ্য শব্দতরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের সঙ্গে তুলনীয় এবং তার দৈর্ঘ্য বরাবর কণাসরণ পর্যায়ক্রমে বাড়া-কমা করে ; অনুনাদকের আয়তন তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের চেয়ে অনেক ছোট, তাই বায়ুগহ্বরে সর্বত্রই সরণ সমান এবং নগণ্যমান। (৩) নলের দৈর্ঘ্য এবং কম্পাংকের গুণফল (nl) ধ্রুবক (১৪-৫.১৭ ও ১৮), আর অনুনাদকের কণ্ঠদৈর্ঘ্য এবং কম্পাংকের মধ্যে সম্পর্ক $n^2 l =$ ধ্রুবক (১৪-১২.৯) ; আপাতদৃষ্টিতে তাদের আচরণ অসমঞ্জস।

তবে রিচার্ডসন শাব্দবাধের দৃষ্টিভঙ্গী থেকে বিচার ক'রে এদের অসঙ্গতি খণ্ডন করেছেন। ১৪-৫.১২ সমীকরণকে

$$(Z_a)_l = \frac{\rho_0 c}{S}\cdot\frac{1+(B/A)e^{2j\beta l}}{1-(B/A)e^{2j\beta l}}$$

আকারে লেখা যায়। তা-থেকে দেখানো সম্ভব যে,

যেহেতু $$\frac{B}{A}=\frac{(Z_a)_0-\rho_0 c/S}{(Z_a)_0+\rho_0 c/S} \quad (১৪\text{-}৫.১৩)$$

সেইহেতু $$(Z_a)_l=\frac{(Z_a)_0-(j\rho_0 c/S)\tan\beta l}{(Z_a)_0(S/j\rho_0 c)\tan\beta l+1} \quad (১৪\text{-}১২.১০)$$

হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকে l খুব ছোট, তাই $\tan\beta l \simeq \beta l$; সুতরাং ছোট ছিদ্র (orifice) তথা খুবই হ্রস্বকণ্ঠের শাব্দবাধ $(Z_a')_0$ বার করতে $(Z_a)_l=0$ এবং $\tan\beta l \simeq \beta l$ বসালে, পাচ্ছি

$$(Z_a)'_0=\frac{j\rho_0 c}{S}\beta l=\frac{j\rho_0 c}{S}\cdot\frac{\omega}{c}\cdot l=\frac{j\rho_0\omega}{\kappa} \quad (১৪\text{-}১২.১১)$$

নলের $x=l$ মুখ বন্ধ থাকলে, সেখানে পূর্ণ-প্রতিফলন হবে এবং ১৪-৫.১৬ সমীকরণ থেকে পাব

$$(Z_a)_l=-j(\rho_0 c/S)\cot\beta l$$

এখন, আংশিকভাবে বন্ধ নলে শাব্দবাধ, নলের এবং ছিদ্রের শাব্দবাধের যোগফলের সমান হবে। তাই $x=0$ প্রান্তে আংশিক বন্ধ এবং $x=l$ প্রান্তে সম্পূর্ণ বন্ধ নলের শাব্দবাধ হবে আগের দুই সমীকরণের যোগফল। তাহলে

$$(Z_a)_l=j\rho_0\left(\frac{\omega}{\kappa}-\frac{c}{S}\cot\beta l\right) \quad (১৪\text{-}১২.১২)$$

এইরকম নলে যখন অনুনাদ হবে, তখন $(Z_a)_l=0$;

$$\therefore\ \omega/\kappa=(c/S)\cot\beta l \text{ বা } \tan\beta l=\frac{\kappa c}{\omega S}=\frac{\kappa}{\beta S} \quad (১৪\text{-}১২.১৩)$$

এই সমীকরণটি বেলনাকার নলের ভেতরে বায়ুর আচরণ নির্দেশ করে, κ-র মান যখন খুবই বেশী, $\tan\beta l\to\infty$, অর্থাৎ $\cot\beta l\simeq 0$; ১৪-৫.১৭ থেকে, $nl=$ ধ্রুবক—এই সর্তটি নলের ক্ষেত্রে মূল সুরের কম্পাংকের নিয়ন্ত্রক। আবার, κ যখন খুব ছোট তখন $\tan\beta l$ও খুব ছোট; তাহলে ১৪-১২.১৩ থেকে পাই, $\beta l=\kappa/\beta S$ বা $\beta=\sqrt{\kappa/V}$

$$\therefore\ n=\frac{\beta c}{2\pi}=\frac{c}{2\pi}\sqrt{\kappa/V}=\frac{c}{2\pi}\sqrt{S/lV} \quad (১৪\text{-}১২.১৪)$$

এটি হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকের মূল সুরের কম্পাংক। নল ও অনুনাদকের আচরণে তাহলে সঙ্গতি রয়েছে। মনে রাখা ভালো যে, অনুনাদকের উপসুরগুলির কম্পাংক যথেষ্ট বেশী। উপসুরগুলি বিবেচনা করতে গেলে বায়ুগহ্বরের জড়তা আর নগণ্য ধরা যায় না, সুতরাং ওপরের সরল বিশ্লেষণ তখন আর প্রযোজ্য নয়।

অনুনাদকের সাড়া ঃ এতে (১) বিকিরণ অল্প, (২) পুনর্নাদ দুর্বল, (৩) অবদমন সামান্য, এবং (৪) তাই স্পন্দন তথা সাড়া, দীর্ঘস্থায়ী ; কাজেই অনুনাদ-খরতা তীক্ষ্ণ। এইজন্যই হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকের, মিশ্র শব্দ থেকে সুর-নির্বাচনের ক্ষমতা খুব খর।

যেহেতু এর মূল কম্পাংক আয়তন-নির্ভর, তাই ভিন্ন ভিন্ন সুরে সাড়া পেতে ভিন্ন ভিন্ন মাপের অনুনাদক দরকার। কাজেই স্বরগ্রামের (musical scale) এক অষ্টক জুড়ে সাড়া পেতে অনেকগুলি অনুনাদক লাগে। এই অসুবিধা দূর করতে ক্যোনিগ বেলনাকৃতি অনুনাদক (চিত্র 14.16b) তৈরী করেছেন। এতে দুটি বেলন থাকে ; একটি অপরটির মধ্যে ঢুকতে-বেরোতে পারে এবং সেইভাবে অনুনাদকের কার্যকরী আয়তন তথা মূল কম্পাংক ইচ্ছামতো বদ্‌লানো সম্ভব। এর B প্রান্ত থেকে রবারের নল দিয়ে ক্যোনিগ-এরই উদ্ভাবিত চাপমান-কোষ জুড়ে দিয়ে খুব দুর্বল শব্দসন্ধান করা যায়। শব্দসন্ধানে দক্ষতা আরও বাড়াতে বয়েজ্‌ দুটি সুরবদ্ধ (tuned) বেলনকে বেঁটে, মোটা একটি নল দিয়ে যুক্ত ক'রে দ্বি-অনুনাদক (চিত্র 16.15c) তৈরি করেছেন। টাকার (Tucker)-উদ্ভাবিত তপ্ত-তার মাইক্রোফোন (§১৫-৯খ) বিশেষ উদ্দেশ্যে প্রযোজ্য সুবেদী হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদক মাত্র।

প্রশ্নমালা

১। সীমিত মাধ্যমে অনুনাদের সঙ্গে উৎপন্ন স্থাণুতরঙ্গের সম্পর্ক ঘনিষ্ঠ —সীমিত বায়ুমাধ্যমের পরিপ্রেক্ষিতে উক্তিটি আলোচনা কর। সীমিত বায়ু-মাধ্যম কি কি আকারে পাওয়া সম্ভব ? তাদের ব্যবহারিক প্রয়োগের সংক্ষিপ্ত আলোচনা কর।

২। সরল বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনে, নলের খোলা মুখ থেকে প্রতিফলন হয় ব'লে ধরে নেওয়া হয়। এই ধারণার সপক্ষে তোমার যুক্তি কি ? শাব্দচাপের প্রতিফলন-গুণাংক কেমন ক'রে মাপা যায় ?

বাতযন্ত্রের নলে স্পন্দনের লালন কি-ভাবে হয়ে থাকে ?

৩। নলে শব্দতরঙ্গের প্রসার-সম্পর্কিত অবকল সমীকরণের প্রতিষ্ঠা কর। এই ব্যুৎপত্তিতে কি কি সরলীকরণ অঙ্গীকার করা হয়? সমীকরণের সমাধান লেখ এবং খোলা ও বন্ধ নলে বিশিষ্ট কম্পাংকগুলি নির্ণয় কর। তাদের সঙ্গে দণ্ডের কম্পাংকশ্রেণীর সাদৃশ্য নির্দেশ করতে পার কি? নলের এই কম্পাংকগুলি কি কি কারণে ও কতখানি ক'রে বদ্‌লায়?

৪। শাব্দবাধ কাকে বলে? নলের শাব্দবাধ ও তার প্রায়োগিক মান-নির্ণয় সম্বন্ধে একটি আলোচনা লেখ। [৮–৬ অনুচ্ছেদ দেখ।]

৫। ফ্লু-অর্গান-নলে স্পন্দনের উৎপত্তি ও লালন কি ক'রে হয়? এরকম নলে স্পন্দনের প্রকৃতি আলোচনা কর। এই স্পন্দনরীতির প্রায়োগিক অনুসন্ধানের উপায় কি কি? এই প্রসঙ্গে রিচার্ডসন-এর চাপমান-কোষ বর্ণনা কর।

৬। প্রবাহী মাধ্যমে ঘূর্ণির উৎপত্তি কি-ভাবে হয় এবং তারা কি-ভাবে শব্দ উৎপন্ন করতে পারে? বায়ব সুর এবং ফলক-সুরের উৎপত্তি বিশদভাবে বর্ণনা কর। রন্ধ্রসুর সম্বন্ধে কি জান?

৭। কুণ্ড্-নলে বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনের রীতিপ্রকৃতি আলোচনা কর। স্পন্দনকালে যে বিলেখের উৎপত্তি হয়, তাদের গুরুত্ব কি? তারা কি-ভাবে উৎপন্ন হয়, বিশদভাবে ব্যাখ্যা কর।

৮। বন্ধ এবং খোলা নলে উৎপন্ন কম্পাংকমালা শাব্দবাধের দৃষ্টিভঙ্গী থেকে প্রতিষ্ঠা কর। এই দুয়ে উৎপন্ন স্বরের পার্থক্য আলোচনা কর প্রান্তীয় ত্রুটি এই পার্থক্য কি-ভাবে প্রভাবিত করে?

৯। নলে বায়ু এবং হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকে বায়ুর মধ্যে স্পন্দনের পার্থক্য নির্দেশ কর। নল, শংকু, শিঙা ও অনুনাদক—এদের স্বনক ও গ্রাহক হিসাবে ভূমিকার তুলনামূলক আলোচনা কর। শিঙার শ্রেণীবিভাগ কর এবং তাদের কৃতি সম্পর্কে সংক্ষেপে আলোচনা কর।

১০। হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকের অনুনাদী কম্পাংক নির্ণয় কর। এরা কয়রকমের? এদের ক্রিয়াপদ্ধতি এবং প্রায়োগিক ব্যবহার আলোচনা কর।

১১। দণ্ড, অসীম কঠিন, নলে জল এবং গহ্বরে বায়ু—এদের মধ্যে কি কি প্রধান শ্রেণীর স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ সম্ভব? প্রতিটি ক্ষেত্রে সংশ্লিষ্ট স্থিতিস্থাপক গুণাংকগুলি লেখ।

১৮

স্বনক ও গ্রাহক

(Sources and Receivers of Sound)

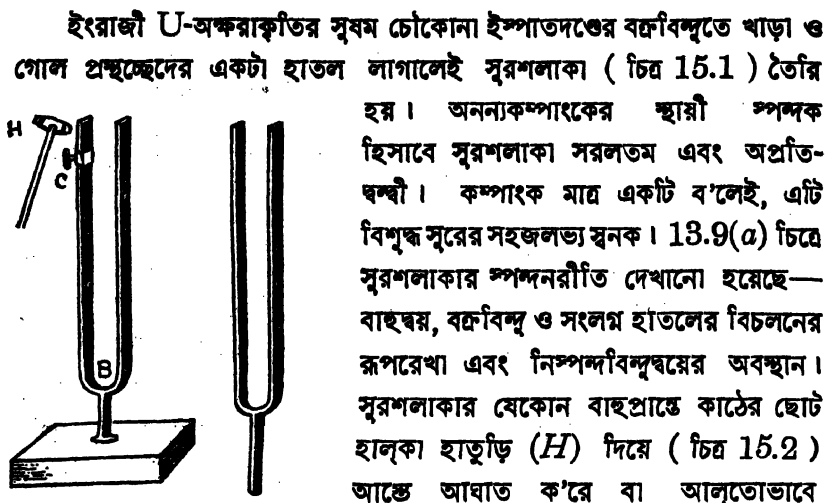
১৮-১. সূচনা :

স্বনক বলতে একটানা **সুরেলা শব্দের** উৎস, এবং **গ্রাহক** বলতে সেই **সুর-সন্ধানী** বোঝায়। সাধারণত স্বনকম্পাংক পাল্লায় ($50\sim$ থেকে $20kHz$) স্পন্দমান স-টান তার, ঝিল্লী, ছদ, মুক্ত বা আধৃত বা আবদ্ধ কঠিন দণ্ড বা পাত, বায়ুস্তম্ভ বা আবদ্ধপ্রায় বায়ুগহ্বর—এরাই সুরেলা শব্দের উৎস ; নানারকম বাদ্যযন্ত্রই এদের (§১৭-১৩—১৭-১৬) যথাযোগ্য উদাহরণ। যারা স্বনক, অনেকক্ষেত্রেই তাদের অনেকে গ্রাহকের ভূমিকাও নিয়ে থাকে। যেমন—লাউডস্পীকারে যে স-টান ছদ স্বনক, সেই ছদ-ই মাইক্রোফোনে গ্রাহক। অর্গান নল বা বাঁশীতে যে বায়ুস্তম্ভ স্বনক, হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদক বা তপ্ত-তার-মাইক্রোফোনে সেই বায়ুস্তম্ভই শব্দসন্ধানী। এ ব্যাপারে স্বনক ও শব্দসন্ধানী, তাপীয় এঞ্জিন এবং ফ্রিজের মতো বা বৈদ্যুতিক জেনারেটর এবং মোটরের মতোই বিপরীতমুখী বা অপনেয় অভিন্ন যন্ত্রযুগ্ম।

আমাদের আলোচনা মোটামুটিভাবে যান্ত্রিক এবং বৈদ্যুতিক পদ্ধতিতে স্পন্দমান স্বনকেই সীমিত থাকবে। এই শ্রেণীর স্পন্দকেরা এই এই শক্তিকে সংক্রমিত (tranceduce) বা রূপান্তরিত করে—প্রধান উদাহরণ সুরশলাকা এবং লাউড-স্পীকার। এ ছাড়াও, তাপশক্তি-লালিত স্পন্দনে শব্দের উৎপাদনও আমরা সংক্ষেপে শিখব ; এরা বৈজ্ঞানিক অনুসন্ধিৎসার বিষয়বস্তু হলেও, তাদের ব্যবহারিক গুরুত্ব সামান্যই ; সরল শব্দসন্ধানী হিসাবেও এদের প্রয়োগ আছে। আমাদের গলা এবং কানই আমাদের কাছে সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ স্বনক ও গ্রাহক ; তাদের বর্ণনা ১৭ অধ্যায়ে মিলবে। এই অধ্যায়ে আমাদের মুখ্য আলোচ্য বিষয় হচ্ছে

$$\left.\begin{array}{r}\text{যান্ত্রিক}\\ \text{বৈদ্যুতিক}\\ \text{তাপ}\end{array}\right\}\ \text{শক্তি} \rightleftharpoons \text{শব্দশক্তি}$$

—এই শ্রেণীর শক্তি-সংক্রমণ বা রূপান্তর, ব্যতিহারী (reciprocal) হয়।

১৫-২. সুরশলাকা :

ইংরাজী U-অক্ষরাকৃতির সুষম চৌকোনা ইস্পাতদণ্ডের বক্রবিন্দুতে খাড়া ও গোল প্রস্থচ্ছেদের একটা হাতল লাগালেই সুরশলাকা (চিত্র 15.1) তৈরি হয়। অনন্যকম্পাংকের স্থায়ী স্পন্দক হিসাবে সুরশলাকা সরলতম এবং অপ্রতিদ্বন্দ্বী। কম্পাংক মাত্র একটি ব'লেই, এটি বিশুদ্ধ সুরের সহজলভ্য স্বনক। 13.9(a) চিত্রে সুরশলাকার স্পন্দনরীতি দেখানো হয়েছে—বাহুদ্বয়, বক্রবিন্দু ও সংলগ্ন হাতলের বিচলনের রূপরেখা এবং নিস্পন্দবিন্দুদ্বয়ের অবস্থান। সুরশলাকার যেকোন বাহুপ্রান্তে কাঠের ছোট হাল্‌কা হাতুড়ি (H) দিয়ে (চিত্র 15.2) আস্তে আঘাত ক'রে বা আল্‌তোভাবে বেহালার ছড় টেনে বা অন্যভাবে বিচলিত ক'রে একে বাজানো হয়।

চিত্র 15.2 সুরশলাকা চিত্র 15.1

বাহু-দুটির একযোগে অন্তর্মুখী বা বহির্মুখী আন্দোলনে সামান্য পরিমাণ বায়ুই বিচালিত হয় ; তার ফলে স্বল্পহারে শক্তি-বিকিরণ হয় এবং তাই শব্দ দুর্বল এবং স্পন্দন দীর্ঘস্থায়ী হয়। শব্দ জোরালো করতে সুরশলাকাটিকে যথাযোগ্য মাপের এক-মুখ-খোলা ফাঁপা কাঠের বাক্সে বসানো (চিত্র 15.2) থাকে। তখন স্পন্দনকালে, বক্রবিন্দু B এবং তৎসংলগ্ন হাতলের ওঠা-নামা হতে থাকায়, বাক্সপৃষ্ঠ এবং ভেতরের বায়ুতে পরবশ কম্পন হয় ; এতে বেশী পরিমাণ বায়ু বিক্ষুব্ধ হওয়ায় শব্দ জোরে হয় ; তাতে দ্রুতহারে শক্তি-বিকিরণ ঘটে, ফলে স্পন্দনকাল সংক্ষিপ্ত হয়ে যায়। বাক্সের মাপ সঠিক হলে, সুরশলাকা এবং বায়ুগহ্বরের মধ্যে অনুনাদী যোজন হয়ে শব্দপ্রাবল্য চূড়ান্ত মান পায়।

সুরশলাকার স্বকীয় কম্পাংকের সামান্য অদলবদল সম্ভব। যেমন, তার যেকোন বাহুপ্রান্তে একটু মোম লাগালে বা দু'-এক-পাক খুব সরু তার জড়ালে তার ভর সামান্য বাড়ে, সুতরাং কম্পাংক সামান্য কমে ; আবার উখা (file) দিয়ে একটু চেঁছে দিয়ে কম্পাংক সামান্য বাড়ানো যায়। বড় ভারী সুরশলাকার যেকোন বাহুতে সরণক্ষম একটি স্ক্রু-লাগানো কলার (১৫.২ চিত্রে C) থাকে ;

সেটিকে বাহুর ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় এঁটে রেখে কম্পাংক অল্পবিস্তর বদ্‌লানো চলে ; C ওপরে উঠলে, কম্পাংক কমে ; নীচে নামলে, বাড়ে।

সুরশলাকার কম্পাংক : ১৩-৬.৭ এবং ১৩-৬.৯, এই দুই সমীকরণ তুলনা করে দেখা যাচ্ছে যে, সুরশলাকার যেকোন বাহুর কম্পাংক হবে

$$n=\frac{1.194\pi}{8}\cdot\frac{\kappa c_l}{l^2}=\frac{1.194\pi\kappa}{8}\cdot\frac{1}{l^2}\left(\frac{q}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$=\frac{K\kappa}{l^2}\sqrt{q/\rho} \qquad (১৫\text{-}২.১)$$

এখানে $\kappa=$ দণ্ডের আবর্তন ব্যাসার্ধ, $l=$ স্পন্দমান বাহুর দৈর্ঘ্য এবং K নির্দিষ্ট দণ্ডের পক্ষে একটি অচর রাশি।

যদি ধরে নেওয়া হয় যে, সুরশলাকার কম্পাংক (n)—তার বাহুদৈর্ঘ্য (l) এবং উপাদানের ঘনত্ব (ρ) ও ইয়ং-গুণাংকের (q) ওপর নির্ভরশীল, তাহলে মাত্রাবিশ্লেষণ থেকে কম্পাংক-সমীকরণ বার করা সম্ভব। সে-অবস্থায়

$$n=Kl^x\rho^y q^z \text{ (} K \text{ মাত্রীয় ধ্রুবক ; } x, y, z \text{ নির্ণেয় ঘাতের মান)}$$

এখন মাত্রাবিচারে, $n=T^{-1}$, $l=L$, $\rho=ML^{-3}$ এবং $q=MLT^{-2}/L^2$

$$\therefore \quad T^{-1}=KL^x.(ML^{-3})^y.(MLT^{-2})^z$$

$$=K.L^{x-3y-z}.M^{y+z}.T^{-2z} \qquad (১৫\text{-}২.২)$$

দুই দিকের মাত্রা সমীকৃত করে পাই

$$x-3y-z=0,\ y+z=0 \text{ এবং } 2z=1$$

অর্থাৎ, $z=\frac{1}{2}$, $y=-\frac{1}{2}$ এবং $x=-1$

$$\therefore \quad n=Kl^{-1}\rho^{-\frac{1}{2}}q^{\frac{1}{2}}=\frac{K}{l}\ (q/\rho)^{\frac{1}{2}} \qquad (১৫\text{-}২.৩)$$

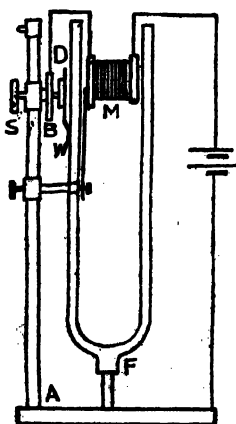
১৫-২.১ সমীকরণ থেকে দেখছি যে, κ/l^2 মাত্রাবিচারে L^{-1} আসে, অর্থাৎ দুই সমীকরণে অসঙ্গতি নেই।

স্বনদণ্ড : আজকাল 4000 হার্ৎজ-এর বেশী কম্পাংকের সুরশলাকা তৈরী হয় না। কারণ কম্পাংক বাড়াতে হলে বাহুকে ছোট করতে হয় এবং এই কম্পাংকের ঊর্ধ্বে বাহুদৈর্ঘ্য এত ছোট হয়ে যায় যে, সমস্ত ভৌতধর্ম অক্ষুণ্ণ রেখে দণ্ডটি বাঁকানো প্রায় অসম্ভব। তাই এই কম্পাংক-সীমার ঊর্ধ্বে 20 kHz পর্যন্ত, হাল্কা সংকর ধাতু ডুর্যালুমিনের তৈরী এবং মধ্যবিন্দুতে

দৃঢ়ভাবে বদ্ধ চৌকো দণ্ড, স্বনক হিসাবে ব্যবহৃত হচ্ছে। রবার-ঢাকা হাল্‌কা হাতুড়ি দিয়ে অক্ষ-বরাবর আঘাত করলে দণ্ডের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন হয়; সেই স্পন্দন উচ্চকম্পাংকের সুরশলাকার চেয়ে অনেক বেশীক্ষণ স্থায়ী হয়, আর নিঃসারিত সুর বিশুদ্ধই হয়।

১৫-৩. সুরশলাকার স্পন্দনের স্থায়িত্ব-রক্ষা বা লালন বা পোষণ:

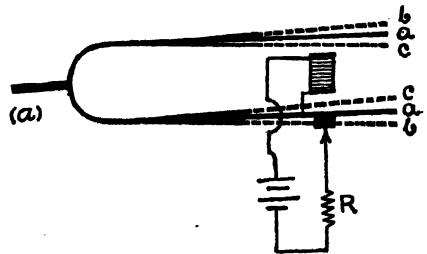
আঘাত ক'রে বা ছড় টেনে সুরশলাকায় যে এককালীন শক্তিসঞ্চার করা হয়, স্পন্দনের ফলে তা বিকিরিত এবং অপচিত হতে হতে শেষপর্যন্ত ফুরিয়ে যায়। স্পন্দন অক্ষুণ্ণ রাখতে হলে যথাযথ দশায় তাকে খানিকটা ক'রে শক্তি যোগাতে হবে। এই ব্যাপারটা পরবশ কম্পনের মতোই; তফাৎটা এই যে, এখানে এক সেকেণ্ডের মধ্যে শক্তি-যোগানের সংখ্যা (frequency) সুরশলাকার নিজস্ব কম্পাংক দিয়েই নিয়ন্ত্রিত, অথচ পরবশ কম্পনে চালিতের কম্পাংক কিন্তু, চালকের কম্পাংক-শাসিত। যেসব ক্ষেত্রে চালিত সংস্থার স্বীয় কম্পাংক চালকের কম্পাংক নিয়ন্ত্রিত করে, তাকে **পোষিত** বা **লালিত স্পন্দন** বলে; আগে ছড়-টানা তারের স্পন্দন-রক্ষায় এর উদাহরণ আমরা পেয়েছি। সুরশলাকার স্পন্দন বৈদ্যুতিক পন্থায় লালিত হয়।

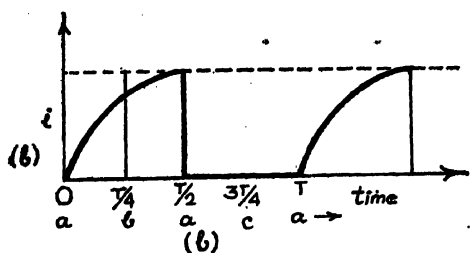
ক. বিদ্যুৎ-চুম্বকের সাহায্যে: বড়, ভারী, অল্পকম্পাংকের (64~ সে থেকে 128~ সে) সুরশলাকার স্পন্দনে বৈদ্যুতিক ঘণ্টা বাজানোর প্রক্রিয়াতে স্থায়িত্ব দেওয়া হয়; প্রক্রিয়াটিকে যোজন-খণ্ডন (make and break) পন্থা বলা চলে। 15.3 চিত্রে সুরশলাকাটি (F) একটি কঠিন ধাতুর আসনে দৃঢ়ভাবে প্রোথিত থাকে। দুই বাহুর মাঝে সমান ফাঁক রেখে মাঝখানে বিদ্যুৎ-চুম্বকটি (M) রাখা হয়। এর একটি বাহুতে লাগানো প্লাটিনামের তারের টুকরোটি (W) একটি প্লাটিনামের চাকতিকে (D) ছুঁয়ে থাকে; সেই চাকতিটি আবার স্ক্রু (S)-লাগানো আর একটি চাকতি B-র সঙ্গে যুক্ত; D-B চাকতি-সমন্বয়টি বাহুর সমান্তরাল দণ্ড (A) বরাবর চলাফেরা করতে পারে। ছবিতে ব্যাটারির সঙ্গে

চিত্র 15.3—বিদ্যুৎ-চুম্বক-লালিত সুরশলাকা

বৈদ্যুতিক সংযোগ নির্দেশিত রয়েছে। অল্পকম্পাংকের সুরশলাকাগুলি ভারী হয় ব'লে তাদের সাধারণত অনুভূমিকভাবে রাখা হয়।

বাহুপ্রান্তে টোকা দিয়ে স্পন্দন সুরু করা হয়। বাহু অন্তর্মুখী হলে, D-তে বৈদ্যুতিক সংযোগ কেটে যায় (খণ্ডিত), ফলে বিদ্যুৎ-ধারা থেমে যায়। পরে সে বহির্মুখী হলে, সংযোগ পুনঃপ্রতিষ্ঠিত (যোজিত) হয়। তখন বিদ্যুৎ-ধারা চালু হয়ে চুম্বকটিকে সক্রিয় করে ; তার আকর্ষণে বাহুগুলি ভেতরদিকে ঢোকে এবং তাতে বর্তনী আবার খণ্ডিত হয়। তখন চুম্বক আকর্ষণ হারায় এবং বাহুগুলি বাইরের দিকে সরে এসে যোজন পুনঃপ্রতিষ্ঠা করে। বারবারই এইরকম যোজন এবং খণ্ডন হয়ে সুরশলাকা কাঁপতে থাকে।

স্পন্দন-লালনের মুল তত্ত্ব ঃ প্রতিবারই সংযোগ-প্রতিষ্ঠাকালে চুম্বকের আকর্ষণে বাহুদ্বয় যে অন্তর্মুখী হয়, সেই আকর্ষণই স্পন্দন পোষণ করে এবং সুরশলাকায় অনুনাদী স্পন্দন জাগায়। বিদ্যুৎ-চুম্বক এখানে চালক, কিন্তু দেখাই যাচ্ছে যে, তার সক্রিয় হওয়ার পর্যাবৃত্তি নির্ভর করছে চালিত সুরশলাকার স্বকীয় কম্পাংকের ওপর ; কাজেই দুটির পর্যাবৃত্তি সমান। এই আত্ম-নিয়ন্ত্রিত বা পালিত শক্তি যোগায় ব্যাটারি বা বিদ্যুৎ-শক্তির উৎস।

সুরশলাকার বিদ্যুৎ-বর্তনীতে স্বাবেশ থাকায়, যোজন-কালে এবং খণ্ডন-কালে বর্তনীতে ভিন্ন পরিমাণের আধান আবর্তিত হয় ; আবর্তিত আধানের অন্তরই প্রতি চক্রে স্পন্দনরক্ষায় ব্যয়িত বিদ্যুৎশক্তি। ১২-১৩ অনুচ্ছেদে আমরা অনুরূপ ব্যাপারই দেখেছি—ছড়ের অগ্রগমন এবং পশ্চাদ্‌গমনের কালে কৃত কার্যের তফাৎই তারের স্পন্দন পোষণ ক'রে থাকে। $15.4(a)$ এবং (b) চিত্রে এই পোষণ ব্যাপারটির ব্যাখ্যা দেওয়া হয়েছে। ধরা যাক, বিদ্যুৎ-চুম্বকের চালক কুণ্ডলীতে L পরিমাণ বিশুদ্ধ স্বাবেশ এবং বর্তনীর অন্যত্র R পরিমাপ বিশুদ্ধ রোধ সংহত আছে, অর্থাৎ বর্তনীটি L-R শ্রেণী সমবায় (চিত্র $15.4a$) এবং T, সুরশলাকার পর্যায়কাল। $T/2$ কাল ধ'রে আকৃষ্ট বাহু a থেকে b পর্যন্ত গিয়ে a-তে ফিরে আসে, ততক্ষণই বর্তনীতে প্রবাহ চালু থাকে ; আবার যতক্ষণ অর্থাৎ $T/2$ কাল ধ'রে বাহু a অতিক্রম ক'রে c পর্যন্ত

চিত্র 15.4(a)
বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় স্পন্দন-পোষণের ব্যাখ্যা

গিয়ে আবার a-তে ফিরে আসে ততক্ষণ বর্তনী ধারাহীন। বর্তনী চালু থাকাকালে $t=0$ থেকে $t=T/2$ সময় ধ'রে বিদ্যুৎ-ধারার পরিমাণ বাড়তে থাকে এবং এই বাড়ার হার L, R এবং E-র ওপর নির্ভর করে; $t=T/2$ মুহূর্তে (চিত্র 15.4b) হঠাৎ প্রবাহ-ছিন্ন হয়ে শূন্যমানে নেমে যায়। a থেকে b পর্যন্ত যাওয়ার কালে ($t=0$ থেকে $t=T/4$ পর্যন্ত) চৌম্বককুণ্ডলীর মধ্যে দিয়ে Q_1 পরিমাণ আধান চলে এবং তখন L-এর ক্রিয়ায় বাহুর বহির্গতি ব্যাহত হতে থাকে; আবার b থেকে a-তে ফিরে আসার কালে ($t=T/4$ থেকে $t=T/2$ পর্যন্ত) L-এর ক্রিয়ায় বাহুর অন্তর্গতি সমর্থিত হয় এবং তখন কুণ্ডলীতে Q_2 আধান চলে। এদের অন্তর Q_2-Q_1 পরিমাণ আধান, প্রতি চক্রে স্পন্দনরক্ষায় খরচ হয়। বর্তনী চালু হওয়ার $t=t$ ক্ষণ পরে

চিত্র 15.4b—সুরশলাকার লালন-বর্তনীতে ধারাভেদ

$$i=\dot{Q}=\frac{E}{R}(1-e^{-Rt/L}),\quad Q_1=\int_0^{T/4} i.dt,\quad Q_2=\int_{T/4}^{T/2} i.dt$$

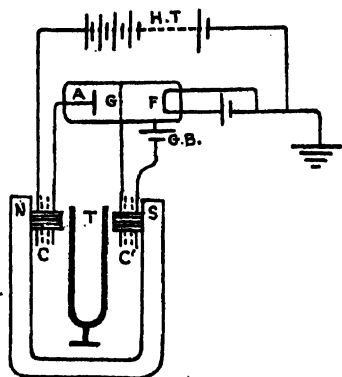
এবং স্পন্দকের দক্ষতা (efficiency)

$$\eta=\frac{Q_2-Q_1}{Q_2+Q_1}=\frac{(L/R)(1+e^{-RT/2L}-2e^{-RT/4L})}{\frac{1}{2}T-(L/R)(1-e^{-RT/2L})}$$

দেখা যাচ্ছে, L/R অনুপাতই মোটামুটিভাবে স্পন্দন দক্ষতা নিয়ন্ত্রণ করে। যখন $L \gg R$ হয়, তখনই দক্ষতার চরম-মান ($\simeq \frac{1}{2}$) আসে। কাজেই বর্তনীতে স্বাবেশ যত বেশী থাকে ততই ভালো; কিন্তু সেক্ষেত্রে আবার বৈদ্যুতিক সংযোগ ছিন্ন হওয়ার সময়, W এবং D-র মধ্যে জোর স্ফুলিঙ্গ হয়ে সংযোগ-বিন্দুতে ক্ষয়ক্ষতি ঘটতে পারে। এই ত্রুটি এড়াতে শ্রেণীতে রোধ এবং W-D-র সমান্তরালে একটি ধারক যোগ করা হয়। স্বাবেশের ক্রিয়াতেই, বর্তনীতে প্রবাহ প্রতিষ্ঠা করতে আধান যতটা কাজ করে, প্রবাহ ছিন্ন হতে তার চাইতে কম শক্তি বর্তনীতে ফিরে আসে—এই তফাৎটাই স্পন্দন পোষণ করে।

খ. ট্রায়োড ভাল্‌ভের সাহায্যে: সুরশলাকার কম্পাংক 100 ~ পার হয়ে গেলে বিদ্যুৎ-চুম্বক বিশেষ কার্যকরী হয় না; সংযোগস্থলে বিরক্তিকর খড়্‌খড় (rattle) আওয়াজ খুব বেড়ে যায়, যান্ত্রিক যোজন-খণ্ডন আর কম্পন-

সংখ্যার সঙ্গে তাল রাখতে পারে না। 1000~ পর্যন্ত স্পন্দন উদ্দীপিত করতে Triode ভাল্‌ভ বিশেষ কার্যকরী।

15.5 চিত্রে প্রয়োজনীয় যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। এখানে একটি জোরালো স্থায়ী চুম্বকের দুই মেরু N এবং S থেকে কয়েকটি কাঁচা লোহার সরু সরু পিন বেরিয়ে থাকে; তাদের ওপরে দুটি তারের কুণ্ডলী C এবং C' জড়ানো থাকে। ট্রায়োডের প্লেট (A) বর্তনীতে C এবং গ্রিড (G) বর্তনীতে C' কুণ্ডলী-যুক্ত। সুরশলাকার (T) দুই বাহুপ্রান্ত, পিনগুলির কাছাকাছি রাখা হয়; সেই দুই বাহুপ্রান্তে স্থায়ী চুম্বক বিপরীত মেরু আবিষ্ট ক'রে রাখে।

চিত্র 15.5—ট্রায়োড-লালিত সুরশলাকা

বাহু-দুটির বহির্গতি হলে, C' কুণ্ডলীতে বামাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা আবিষ্ট হবে। বর্তনীর সংযোগ এমন করা যে, এই আবিষ্ট ধারা গ্রিডের বিভব বাড়িয়ে তুলে প্লেট-প্রবাহ বাড়াবে। C কুণ্ডলীর পাক এমনভাবে জড়ানো যে, বর্ধিত প্লেট-প্রবাহের ক্রিয়ায় তার কাছের বাহুটি আরও কাছে আসতে চাইবে, সুতরাং স্পন্দনের পোষণ হবে। তবে দুই কুণ্ডলীর পাক যথাযথ দিকে জড়ানো হওয়া চাই। সুরশলাকার বাহুতে আগের মতো W তারটি না থাকায়, এর কম্পাংক কমে না; বাহুপ্রান্তের সঙ্গে কারুর সংযোগ না থাকায়, ঘড়ঘড় শব্দও হয় না।

সুরশলাকা স্থির-কম্পাংক হওয়ায়, খুব যত্নযোগে তৈরী ক'রে এটিকে **সময়ের উপমানক** (sub-standard) হিসাবে অনেকসময়ে ব্যবহার করা হয়। নিম্ন-কম্পাংকের শলাকায় কম্পাংকমানে অশুদ্ধি মাত্র $1:10^4$; তার উপাদান, নির্মাণ-কৌশল এবং স্পন্দনবিস্তার-নিয়ন্ত্রণে যথেষ্ট সাবধানতা নিলে অশুদ্ধি আরও 100 ভাগ কমানো সম্ভব। উষ্ণতার পরিবর্তনে কম্পাংকমান সামান্যই (মোটে $11.4 \times 10^{-6}/^{\circ}$ সে) বদ্‌লায়। আজকাল এলিনভার নামে সংকর ধাতু ব্যবহার ক'রে কম্পাংকের উষ্ণতা-গুণাংক আরও দশভাগ কমানো গেছে।

১৫-৪. তাপ-পালিত স্পন্দন:

কঠিন বা বায়বীয় পদার্থের কোন অংশে সবিরাম বা পর্যাবৃত্ত তাপন ঘটালে স্বনকম্পাংকে স্পন্দন-উৎপাদন ও পোষণ সম্ভব। বস্তুর তপ্ত অংশ আয়তনে বেড়ে

সেই বস্তুরই অন্যত্র সংকোচন বা সরণ ঘটায়। এইরকম বিকৃতি-বল স্পন্দনের সঠিক দশায় প্রয়োগ করা গেলেই অবিরাম স্পন্দন হতে থাকবে। এখানেও শক্তি-সরবরাহের পর্যাবৃত্তি স্পন্দকের স্বকীয় কম্পাংক দিয়েই নির্ধারিত হয়, অর্থাৎ এরাও আত্মনিয়ন্ত্রিত বা পোষিত স্পন্দন। **পালিত স্পন্দনমাত্রেই, উদ্দীপিত স্পন্দকের স্বকীয় কম্পাংকই প্রযুক্ত বলের পর্যাবৃত্তি নিয়ন্ত্রিত করে।**

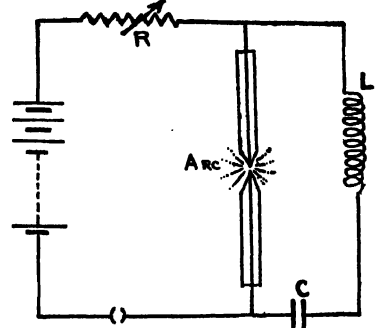
ক. থার্মোফোন বা উষ্মস্বনক : খুব সরু, পরিবাহী তারে জোরালো এবং উচ্চকম্পাংকে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা পাঠিয়ে শব্দসৃষ্টি করা, একটি কার্যকরী আধুনিক ব্যবস্থা। প্রত্যাবর্তী ধারা বাড়া-কমার সঙ্গে সঙ্গে প্রতি চক্রে দু'বার ক'রে তারের উষ্ণতা বাড়ে বা কমে। এই হ্রাসবৃদ্ধির ফলে আশেপাশের বায়ুও পর্যায়ক্রমে ঠাণ্ডা-গরম হতে থাকে; ফলে উষ্ণতাজাত সংকোচন-তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। তবে তার বিস্তার অতি ক্ষীণ হওয়ায় এই শীতল-উষ্ণ পর্যায়ক্রম পরিবাহীর কাছেই সীমিত থাকে। ধারা-কম্পাংক স্বনকম্পাংকের পাল্লার মধ্যে থাকলে উষ্ণতা-পরিবৃত্তি স্বনতরঙ্গের আকারে ছড়াতে থাকে। শহরের রাস্তায় ট্র্যান্স্ফর্মারের কাছে বা বাড়িতে প্রতিপ্রভ (fluorescent) বাতির চোক্-কুণ্ডলীর কাছাকাছি দাঁড়িয়ে মন দিয়ে শুনলে যে একটানা শোঁ-শোঁ শব্দ শোনা যায়, সে-শব্দের উৎপত্তি এই কারণেই।

Lange-উদ্ভাবিত থার্মোফোন-যন্ত্রের কার্যনীতির ভিত্তি এই ঘটনাই। R রোধের মধ্যে দিয়ে $I \sin \omega t$ প্রত্যাবর্তী ধারা গেলে, $RI^2 \sin^2\omega t = \frac{1}{2}RI^2(1-\cos 2\omega t)$ হারে তাপ উৎপন্ন হতে থাকে, অর্থাৎ ধারার দ্বিগুণ কম্পাংকে উষ্ণতার বাড়া-কমা, RI^2 এবং 0 মানের মধ্যে, ঘটতে থাকে; সুতরাং উষ্ম-কম্পাংক ধারা-কম্পাংকের দ্বিগুণ। থার্মোফোনে বিদ্যুৎ-ধারা একটিমাত্র কম্পাংকের হলে বিশুদ্ধ সুর উৎপন্ন হবে। এখন প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার পর্যায়কাল এবং সমমেলের উৎপাদন খুব সহজেই নিয়ন্ত্রণাধীন ব'লে থার্মোফোনে ইচ্ছামতো কম্পাংকের বা স্বনজাতির সুর উৎপন্ন করা সম্ভব। স্বনক হিসাবে এর দক্ষতা উচ্চ, যদিও শব্দপ্রাবল্য কমই। সীমিত কম্পাংকপাল্লায় স্বল্পপ্রাবল্যের শব্দমানক হিসেবে এর ভূমিকা গুরুত্বপূর্ণ। উৎপন্ন শাব্দচাপ সহজে মাপা যায় ব'লে মাইক্রোফোনের ক্রমাংকনে (§১৬-১০) থার্মোফোনের প্রয়োগ আছে।

থার্মোফোনে দিষ্ট (direct) ধারা পাঠিয়ে দ্বিগুণিত কম্পাংকের ধারাংশটি নগণ্য ক'রে ফেলা যায়। এই ধারা I_0 মানের হলে, তাপের উৎপত্তি-হার

$$R(I_0+I\sin\omega t)^2 = RI_0^2 + 2RI_0I\sin\omega t + RI^2\sin^2\omega t$$
$$= R(I_0^2+\tfrac{1}{2}I^2) + 2RI_0I\sin\omega t - \tfrac{1}{2}RI^2\cos 2\omega t$$

এর সমানুপাতিক হবে। I-এর তুলনায় I_0 অনেক বেশী হলে, তৃতীয় রাশিটি অর্থাৎ দ্বিগুণ কম্পাংকের তাপন-প্রভাব নগণ্য হয়ে যাবে। কিন্তু সেক্ষেত্রে যন্ত্রের দক্ষতা কমে যায়।

খ. **স্বর-আর্ক** (Singing Arc) : দিষ্ট ধারায় সক্রিয় কার্বন-আর্কের (চিত্র 15.6) সমান্তরালে যথাযোগ্য মানের স্বাবেশ (L) এবং ধারকের (C) শ্রেণী-সমবায় জুড়ে দিলে, $1/2\pi\sqrt{LC}$ কম্পাংকের তীব্র ও বিশুদ্ধ সুরোৎপত্তি সম্ভব। আর্কটিকে বড় ব্যাটারি এবং পরিবর্তনীয় রোধের সাহায্যে জ্বালানো হয় এবং সমান্তরালে L-C সমবায় রেখে প্রবাহের তথা তাপনের কমা-বাড়া ঘটিয়ে সুরোৎপত্তি করা যায়; স্পন্দন সুষ্ঠুভাবে হতে হলে আবেশ-ধারক সমবায়ের বৈদ্যুতিক বাধ, বর্তনীর রোধের তুলনায় অনেক কম হওয়া চাই। আর্কের ঋণাত্মক রোধ-প্রবণতার জন্যই তার সুরোৎপত্তি হয়; এই আর্ক স্বনক এবং শব্দগ্রাহক দু'ভাবেই কাজ করতে পারে, কিন্তু দুই ভূমিকাতেই এর দক্ষতা সীমিত।

চিত্র 15.6—স্বর-আর্ক

গ. **গীতি-শিখা** (Singing flame) : চওড়া, দীর্ঘ, দু'মুখ-খোলা, খাড়া একটি নলে দাহ্য গ্যাসের ক্ষুদ্র শিখা জ্বালালে অনেকসময়ে প্রবল, অবিচল, বিশুদ্ধ সুর বাজে। জ্বালানী গ্যাস হাইড্রোজেন হলে, পরীক্ষাটি খুব ভালো হয়। সুরোৎসারী এই দীপশিখাকে ঘূর্ণমান আয়নায় লক্ষ্য করলে, তাকে খুব অস্থির দেখায়। গত শতাব্দীতে ডি লা রিভ, ফ্যারাডে, হুইটস্টোন, স্যাণ্ডহোস, র‍্যালে প্রভৃতি বিজ্ঞানীরা এ-বিষয় নিয়ে অনেক পরীক্ষা-নিরীক্ষা, গবেষণা, চিন্তাভাবনা করেছিলেন।

র‍্যালে প্রমাণ করেছেন যে, শিখাশীর্ষে সবিরাম তাপনই সুরোৎপত্তির জন্য দায়ী। এখানে নলের বায়ুস্তম্ভ অনুনাদক এবং চালকের ভূমিকা থাকে তাপনের; টানা সুর পেতে হলে, চরম ঘনীভবনের মুহূর্তেই তাপযোগ এবং চরম তনুভবনের সময়েই তাপবিয়োগ দরকার; তা হলে প্রথমক্ষেত্রে ঘনীভবন আরও বাড়ে, দ্বিতীয়ক্ষেত্রে তনুভবন; অর্থাৎ যে মুহূর্তে যে প্রবণতা, সেটাকেই

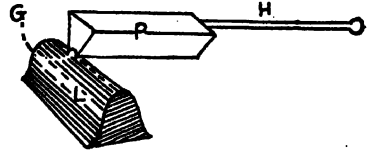
সাহায্য করা হয়—এই ব্যাপারটি গ্রথন-দোলনের পোষিত হওয়ার সর্ত, কিন্তু পরবশ দোলনের বিপরীত (সেক্ষেত্রে শক্তিযোগ হয় স্পন্দকের সাম্য অবস্থায়) ঘটনা। এক্ষেত্রে স্পন্দন পালিত হতে হলে, গ্যাসের সরবরাহ-নলের দৈর্ঘ্য এবং বিন্যাস এমন হতে হবে যে, শিখামূল থেকে সংকোচন অবস্থা গ্যাস-নল বরাবর গিয়ে প্রতিফলিত হয়ে ফিরে আসতে যে সময় লাগবে, সেই সময়ে বায়ুনলেও সংকোচন অবস্থা প্রতিফলনের পর সমদশাতে শিখায় ফিরবে—অর্থাৎ বায়ুস্তম্ভ ও গ্যাস-নল দুয়েতেই স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন হবে। সেই কারণেই দীপশিখা কমে বা বাড়ে, বায়ুস্তম্ভে সবিরাম তাপযোজন হয় এবং সুর বাজার উপযুক্ত দশাসম্পর্ক বজায় থাকে। নলের মধ্যে শাব্দচাপের কোন সুস্পন্দবিন্দুতে শিখাটি থাকলেই শব্দ প্রবলতম হয়।

ঘ. জালি-স্বর (Gauze tones) : বায়ুস্তম্ভে সবিরাম তাপ প্রয়োগ ক'রে, স্থাণুস্পন্দনের **চাপবিস্তার** বাড়িয়ে বিশুদ্ধ সুরের স্বনক হয় গীতি-শিখা ; আবার তাপ-প্রয়োগে বায়ুতে সাময়িক পরিচলন-স্রোত সৃষ্টি ক'রে **বেগবিস্তার** বাড়িয়ে উৎপন্ন করা যায় জালি-সুর।

১৮৫৯ সনে রিজ্‌কে দেখান যে, খাড়া নলের তলার দিকে (এর $\frac{1}{4}$ দৈর্ঘ্যে) তারজালি রেখে এবং তাকে গরম ক'রে রক্তিম অবস্থায় এনে, শিখা সরিয়ে নিলে, যতক্ষণ না সে ঠাণ্ডা হয় ততক্ষণ নলের বায়ুস্তম্ভ সুরোৎপাদন করে। পরের বছর রীস এবং আরও পরে বস্‌কা একই নলের ওপর দিকে তারজালি রেখে, গরম বায়ুস্রোত ঊর্ধ্বমুখে জালির মধ্যে দিয়ে পাঠিয়ে অনুরূপ সুরোৎপত্তি ঘটান। নলের প্রান্তে তারজালি রেখে, তার ওপরে গ্যাস জ্বালিয়েও বায়ুস্তম্ভে শব্দোৎপাদন সম্ভব। এদেরই জালি-সুর বলে।

র‍্যালে এদেরও ব্যাখ্যা দিয়েছেন। তাঁর মতে, জালিতে বায়ুস্রোত, তাপনের দরুন দিষ্ট ঊর্ধ্বমুখী পরিচলন-স্রোত এবং বায়ুস্তম্ভে স্পন্দনজাত প্রত্যাবর্তী স্রোতের মিলিত ফল। ফলে প্রতিবারই বায়ুর মিলিত ঊর্ধ্বস্রোতের সময়ে জালির মধ্যে দিয়ে গরম হাওয়া ব'য়ে উঠে যায় আর নিম্নমুখী স্রোতের সময়ে সেই অতিক্রান্ত গরম হাওয়াই আবার জালিতে ফিরে আসে। তাই ঊর্ধ্বস্রোতের সময়ে সবচেয়ে বেশী উষ্ণতাবৈষম্য থাকে, ফলে তাপসঞ্চালন দ্রুততম হারে হয় এবং ঊর্ধ্বগামী বায়ু সবচেয়ে ঘনীভূত হয়। রিজ্‌কের পরীক্ষায় এই বায়ুস্রোত নলের কেন্দ্রীয় নিস্পন্দবিন্দুমুখী, কাজেই স্পন্দনে সহায়তা হয়। বস্‌কা-র পরীক্ষায়, জালি ওপরের দিকে থাকায়, এই বায়ুস্রোত সেখানে স্বভাবতই

তনুভবন ঘটায় এবং স্পন্দনে বাধা দেয়। এই দুই শ্রেণীর তাপজাত সুর বৈজ্ঞানিক কৌতূহলের বিষয় হলেও প্রায়োগিক-গুরুত্ব-হীন।

ঙ. Trevelyan Rocker : এই বিজ্ঞানী একদিন (১৮৩১) ঘটনাক্রমে লক্ষ্য করেন যে, গরম অবস্থায় একটি লোহার কাঁটা (fork) একটা সীসের ব্লকে রাখায়, সুরেলা শব্দের উৎপত্তি হচ্ছে। তাঁর উদ্ভাবিত যন্ত্রটি 15.7 চিত্রে দেখানো হয়েছে; তাতে L একটি কূর্মপৃষ্ঠ ও অমসৃণ সীসার ব্লক, P এক তামার প্রিজ্‌ম, তার শীর্ষরেখা বরাবর একটি অগভীর নালী (G) কাটা আছে এবং H তার লম্বা হাতল। P-কে বেশ গরম ক'রে, ছবিতে যেমন দেখানো আছে, তেমনিভাবে যদি L-এর ওপর বসানো যায়, তাহলে দেখা যাবে যে, প্রিজমটি পর্যায়ক্রমে দুই নালী-সীমার ওপর ভর দিয়ে ওঠা-নামা করছে এবং তীক্ষ্ণ, প্রবল সুরোৎপাদন করছে। নানা পরীক্ষা-নিরীক্ষান্তে লেস্‌লি ও ফ্যারাডে সিদ্ধান্তে আসেন যে, ঘটনাটি যেকোন ধাতু-যুগ্মে হতে পারে, কিন্তু (১) গরম ধাতুর তাপ-পরিবাহিতাংক ঠাণ্ডা ধাতুর তুলনায় অনেক বেশী, (২) গরম ধাতুর নালী-রেখা বা ক্ষুরধার খুবই পরিষ্কার ও মসৃণ, আর (৩) ঠাণ্ডা ধাতুর পৃষ্ঠতল যথেষ্ট অমসৃণ হওয়া চাই।

চিত্র 15.7

লেস্‌লি-র ব্যাখ্যামতে, তামা থেকে গরম মসৃণ নালী-রেখা বরাবর, সীসাতে দ্রুতবেগে তাপ-সঞ্চালন হয়। সীসার পরিবাহিতা কম হওয়ায়, তাপ তাড়াতাড়ি ব্লকের অন্যত্র ছড়াতে পারে না এবং ঐ লাইন বরাবর সীসা গরমে বেড়ে উঁচু হয়ে ওঠে; তাতে প্রিজ্‌মটি অন্য নালী-রেখার ওপর হেলে পড়ে। তাতে সেখানে চাপ বাড়ে, সংযোগ আরও নিবিড় হয়, ফলে দ্রুত তাপ-সঞ্চালন হয় এবং তখন আগের মতোই দ্বিতীয় রেখাটি উঁচু হয়ে ওঠে; ইতিমধ্যে প্রথম প্রান্তরেখা-বরাবর খাড়াইটি (ridge) ঠাণ্ডা হয়ে সংকুচিত হয়ে নেমে গেছে। তাই দ্বিতীয় নালী-প্রান্ত উঁচু থাকায়, প্রিজ্‌ম প্রথমের ওপরে হেলে পড়ে। এইভাবে পর্যায়ক্রমে দুই ক্ষুরধার ওঠা-নামা করতে থাকে এবং সুরোৎপত্তি ঘটে। বিজ্ঞানী পেজ দুই সমান্তরাল বিদ্যুৎ-বাহী লাইনের ওপর হাল্‌কা ধাতুর প্রিজ্‌ম বসিয়ে (১৮৫৬) এই ঘটনার সমর্থন পেয়েছেন; স্পর্শবিন্দুতে বিদ্যুৎতাপীয় ক্রিয়ায় তাপ উৎপন্ন হওয়ায়, লাইন-দুটিতে পর্যায়ক্রমে খাড়াই সৃষ্টি হয়ে প্রিজ্‌মের দোলন (rocking) এবং ফলে সুরোৎপত্তি হয়।

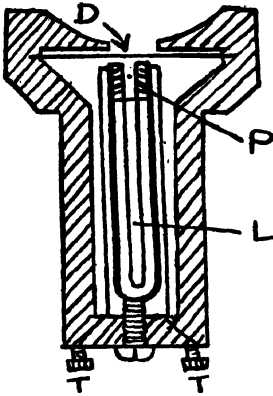
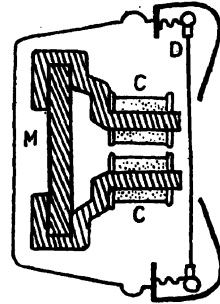
রিচার্ডসন প্রিজ্‌ম-প্রান্ত ওঠা-নামার চাক্ষুষ প্রমাণ উপস্থাপিত (১৯১৩) করেছেন ; তিনি প্রিজ্‌মের ভূমি বরাবর একটি লোহার লম্বা সূচক লাগিয়ে অণুবীক্ষণের সাহায্যে তার সূচীপ্রান্তের ওপর লক্ষ্য রাখেন। একটি ঘূর্ণমান ভ্রমিদৃক্ (stroboscopic) চক্রের ছিদ্রের মধ্য দিয়ে (চিত্র 16.12) সবিরাম কিরণ প'ড়ে অণুবীক্ষণের দৃষ্টিক্ষেত্র ও সূচীপ্রান্ত সান্তরভাবে (intermittently) আলোকিত হতে থাকে। আলোকপাতের অন্তরকাল মোটর-চালিত চক্রের ঘূর্ণনকালের ওপর নির্ভর করে। সেই অন্তর, যখন প্রিজ্‌মের দোলন-কালের কাছাকাছি পৌঁছয় তখন অণুবীক্ষণে সূচীপ্রান্তের পর্যায়ক্রমিক ধীরে ধীরে ওঠা-নামা দেখতে পাওয়া যায়।

মেরী ওয়ালার এই নীতি প্রয়োগ ক'রে কঠিনের স্পন্দন-পোষণের এক নতুন পন্থা (১৯৪০) দেখিয়েছেন—কঠিন ধাতুপাতকে জমাট-বাঁধা CO_2-র স্পর্শে—অর্থাৎ সুপরিবাহীকে শীতলতর কুপরিবাহীর সংস্পর্শে রেখে। এখানে তাপ-সঞ্চালনে CO_2 বাষ্পীভূত হয়ে যথেষ্ট চাপ দিয়ে পাতটিকে অনেকখানি ঠেলে তুলতে পারে ; এভাবে পরীক্ষার উৎকর্ষ অনেক বাড়ে এবং অনেক উচ্চতর স্বভাবী কম্পাংকের বস্তুও স্পন্দিত হতে পারে। ছোট ছোট গোলাকার ও অন্যান্য আকারের পাতে ক্ল্যাডনি-চিত্র (13.11) উৎপাদনে এর ব্যবহারিক প্রয়োগ ঘটেছে। লক্ষণীয় যে, সব পোষিত স্পন্দনের মতো এখানেও শ্লথন-দোলন ঘটছে।

১৫-৫. বিদ্যুৎ-পালিত স্পন্দন :

সবিরাম তাপন ঘটিয়ে স্পন্দনের উদ্দীপন এবং সুরোৎপাদনের নানা নমুনা দেখা গেল। তাদের মধ্যে প্রত্যাবর্তী ও স্পন্দনী বিদ্যুৎ-ধারার ব্যবহারও রয়েছে। এবারে সরাসরি বিদ্যুৎ-লালিত স্পন্দনের নমুনা হিসাবে টেলিফোন-গ্রাহক এবং লাউড-স্পীকার—এই দুই যন্ত্রের কার্যপদ্ধতি আলোচনা ক'রবো। এই দুই যন্ত্রে স্পন্দনী বিদ্যুৎ-ধারার ফলে উৎপন্ন চৌম্বক-তীব্রতার হ্রাসবৃদ্ধি কাজে লাগিয়ে, লোহার পাতলা স-টান ছদকে স্পন্দিত করা হয় ; সেই কম্পাংক স্বনপাল্লায় থাকলেই শব্দ শোনা যায়। এই পন্থায় কিন্তু (১) স্পন্দন আত্মনিয়ন্ত্রিত নয়, সম্পূর্ণভাবে পরবশ এবং (২) দুটি যন্ত্রই ব্যতিহারী বা অপনেয় ক্রিয়ায় শব্দগ্রাহীরও ভূমিকা নিতে পারে—যথাক্রমে দূরভাষ-প্রেরক এবং মাইক্রোফোনের রূপে।

ক. দূরভাষ-গ্রাহক (Telephone Receiver) : গ্রেহাম বেল এই যন্ত্রের আবিষ্কর্তা (১৮৭৬)। 15.8 (*a*) ছবিতে সেটি দেখানো হয়েছে।

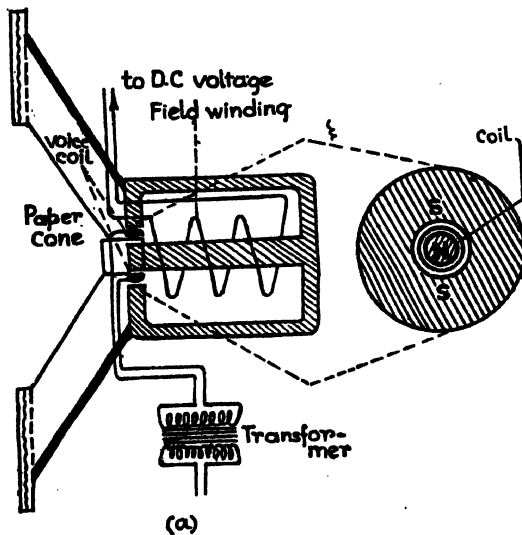
তার প্রধান প্রধান অংশ একটি U-আকৃতির স্থায়ী চুম্বক (L) এবং তার দুই মেরুর সন্নিকটে অন্তরিত পাতলা লোহার ছদ (D)। চুম্বকের মেরু-দুটির ওপরে শ্রেণী-সমবায়ে দুটি খুব পাতলা অন্তরিত তারের কুণ্ডলী—এদের মুক্তপ্রান্ত-দুটি, প্রান্তবন্ধনী T, T-র সঙ্গে যুক্ত। স্থায়ী চুম্বকের দুই মেরুপ্রান্ত (P, P)

চিত্র 15.8(a) টেলিফোন-গ্রাহক চিত্র 15.8(b)

কিন্তু কাঁচা লোহার তৈরী এবং তাদের চুম্বকন এমন ক্রান্তিক মানের যে, কুণ্ডলীতে সামান্য ধারা চললেই চুম্বকন অনেকটা বদ্‌লায়। কুণ্ডলীতে পরিবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা চললে PP-র চুম্বকন, সম-লয়ে বদ্‌লায় এবং D-র ওপর পরিবর্তী আকর্ষণ প্রয়োগ ক'রে তাকে কাঁপায়; ফলে শব্দ উৎপন্ন হয়।

15.8(b) চিত্রে আধুনিক **বেল-গ্রাহক** দেখানো হয়েছে। এখানে D স্ট্যালয় সংকর ধাতুর তৈরী স্পন্দনী-পর্দা। M কোবাল্ট-স্টীলের তৈরী স্থায়ী চুম্বক; তার কাঁচা লোহার মেরুপ্রান্তের ওপরে ধারাবাহী কুণ্ডলী জড়ানো থাকে। এই যন্ত্রে বিদ্যুৎশক্তি শেষ পর্যন্ত শব্দশক্তিতে রূপান্তরিত হচ্ছে।

আবার, D-র ওপর শব্দতরঙ্গ পড়লে সে কাঁপবে ও বিদ্যুৎ-বাহী কুণ্ডলীতে স্থায়ী-চুম্বক-নিঃসৃত বলরেখার সংশ্লিষ্ট-সংখ্যার হেরফের ঘটতে থাকবে এবং বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় আবেশের দরুন কুণ্ডলীতে বিভবভেদ আবিষ্ট হবে; এই কুণ্ডলীর তার আর-একটি অবিকল যন্ত্রের সঙ্গে যুক্ত থাকলে, আবিষ্ট পরিবর্তী ধারা সেখানে D-পর্দাকে কাঁপিয়ে বাতাসে মূল শব্দ-তরঙ্গ পুনরুৎপাদিত করবে,

অর্থাৎ গ্রাহক তখন শব্দপ্রেরকের ভূমিকা নিয়ে শব্দশক্তিকে বৈদ্যুতিক শক্তিতে রূপান্তরিত করছে—একই যন্ত্রের ব্যতিহারী বা অপনের ক্রিয়ার উদাহরণ।

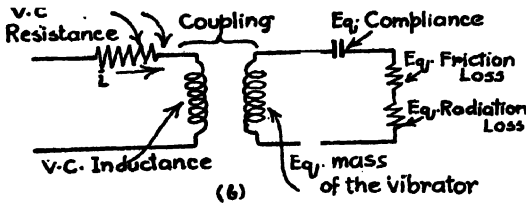
খ. লাউড-স্পীকার: আজকালের শব্দসর্বস্ব নাগরিক সভ্যতায় এই পীড়ক যন্ত্রটির সঙ্গে পরিচয় সবারই। মাইক্রোফোন বা টেলিফোন-প্রেরক, বায়ুতে শব্দতরঙ্গের স্পন্দনী-শক্তিকে পরিবর্তী বিদ্যুৎ-ধারায় রূপান্তরিত করে। সেই বিদ্যুৎ-ধারা টেলিফোন-গ্রাহকের মতোই লাউড-স্পীকারের ছদকে স্পন্দিত ক'রে শব্দসৃষ্টি ঘটায়। সুতরাং মাইক্রোফোন যতরকম নীতিভিত্তিক (§১৫-১০গ) হতে পারে, লাউড-স্পীকারও তত শ্রেণীর হতে পারে। তাদের মধ্যে সর্বাধিক প্রচলিত দোল-কুণ্ডলী (moving coil) বা চল-বৈদ্যুত (electrodynamic) শ্রেণীর লাউড-স্পীকারের বর্ণনা নিচে দেওয়া হচ্ছে।

বর্ণনা: এই লাউড-স্পীকারের (চিত্র 15.9a) প্রধান প্রধান যন্ত্রাংশ চারটি: (১) বিশেষ আকৃতির 'পাত্র' (pot) চুম্বক; (২) স্বরকুণ্ডলী (voice

চিত্র 15.9(a)—দোল-কুণ্ডলী লাউড-স্পীকার

coil) নামে হালকা ছোট্ট দোল-কুণ্ডলী; (৩) কাগজের তৈরী শংকু-আকারের (paper cone) স্পন্দক-ঝিল্লী; এবং (৪) অবক্রম ট্র্যান্স্ফর্মার। চিত্রে বাঁয়ে পার্শ্বচিত্র (elevation), ডাইনে তারই নকশা (plan) দেখানো হয়েছে।

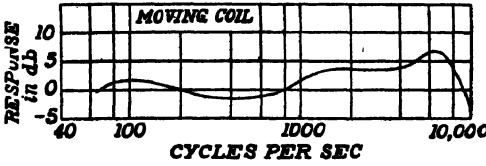
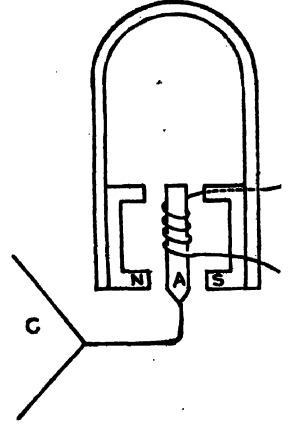
আগেকার দিনে আল্‌মারীর পায়ায় জলসই করবার জন্য একরকম স্তম্ভকেন্দ্রিক বাটি ব্যবহার করা হ'ত (এখনও হয়)—স্থায়ী চুম্বকের আকৃতিও সেইরকম। এই বাটির কিনারা বা কানাটি চওড়া একটি বলয়াকৃতি চাকার মতো, সেটি দক্ষিণমেরুধর্মী (ডানের ছবি দেখ); বাটির মাঝখানে একটি বেঁটে, মোটা স্তম্ভ, তার মাথাটা ছোট থালার মতো, সেটি উত্তরমেরুধর্মী। দুই মেরুর মাঝে আংটার মতো গোল ফাঁকা জায়গায় জোরালো (10^4 oersteds/cm^2) চৌম্বক-ক্ষেত্র। চুম্বকের উপাদান অ্যালনিকো, তার চৌম্বকপ্রবণতা এবং নিগ্রহিতা দুইই খুব বেশী। এই ফাঁকা জায়গাটিতে স্বরকুণ্ডলীটি ঝুলে থাকে। একটি কাগজের ফাঁপা ছোট হালকা বেলনের ওপর খুব সূক্ষ্ম অন্তরিত তারের কয়েক স্তর পাক জড়িয়ে এই দোল-কুণ্ডলীটি তৈরী—তার রোধ 1.5 থেকে 100 ওহ্‌মের মধ্যে, ওজন 0.1 থেকে 4.0 গ্র্যামের মধ্যে থাকে। বেলনটি উত্তরমেরুস্তম্ভের সমাক্ষে ফাঁকা জায়গায় ঝোলানো থাকে। কাগজের বেলনের মাথায় একই অক্ষ বরাবর শংকু-স্পন্দকের ছোট মুখটি লাগানো; শংকুটি শক্ত কাগজে তৈরী এবং তাতে সমাক্ষকেন্দ্রিক অনেকগুলি চক্রাকার ভাঁজ (corrugations) থাকে। শংকুর বহিঃপ্রান্ত ও অন্তঃপ্রান্ত নরম চামড়া বা রবারের চওড়া বলয়াকার ছদ দিয়ে বাঁধা থাকে। স্বরকুণ্ডলী স্পন্দিত হতে থাকলে শংকুটিও কাঁপতে থাকে এবং অনেকখানি বায়ুকে বিচলিত ক'রে উৎপন্ন শব্দকে জোরালো করে। দিষ্ট বিভবভেদ চুম্বককে উদ্দীপ্ত করে। স্বরকুণ্ডলীর সঙ্গে ট্র্যান্‌স্‌ফর্মারের গৌণ কুণ্ডলী যুক্ত আর তার মুখ্যবর্তনী এক অ্যাম্‌প্লিফায়ার বা পরিবর্ধকের সঙ্গে যুক্ত।

ক্রিয়াপদ্ধতি ঃ শব্দতরঙ্গ মাইক্রোফোনের পর্দায় প'ড়ে যে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা জাগায়, তা পরিবর্ধকের ক্রিয়ায় উচ্চবিভবে দুর্বল ধারায় পরিণত হয়ে ট্র্যান্‌স্‌ফর্মারের মুখ্য বর্তনীতে পৌঁছয়। ট্র্যান্‌স্‌ফর্মার অবক্রম-জাতীয় (step-down), অতএব তার গৌণ বর্তনীতে নিম্নবিভবে জোরালো ধারা উৎপন্ন হয়ে স্বরকুণ্ডলীতে পৌঁছয়। সেটি জোরালো অরীয় চৌম্বকক্ষেত্রে থাকায়, তার ওপরে ফ্লেমিং-এর বামহস্ত-সূত্র অনুসারে যান্ত্রিক বল প্রযুক্ত হয় এবং ধারা প্রত্যাবর্তী হওয়ায় এই বলও পর্যাবৃত্ত হয়; ফলে স্বরকুণ্ডলী নাচতে থাকে এবং শংকু-স্পন্দকটিকে সমকম্পাংকে কাঁপাতে থাকে। এই কম্পনশীল শংকু অনেকখানি বায়ুকে বিক্ষুব্ধ করতে থাকায় সজোরে শব্দ হতে থাকে। এই ছদের স্পন্দনমাত্রা বিভব-নির্ভর, তাই উৎপন্ন শব্দতরঙ্গ প্রযুক্ত বিভবভেদের অনুগামী। নিম্ন কম্পাংকে শংকুটির গোটাটাই কাঁপে। কিন্তু উচ্চ কম্পাংকে স্পন্দনকালে শংকুর ভেতরের তলটি, কতকগুলি চক্রাকার নিস্পন্দরেখার

উৎপত্তির কারণে ততগুলি স্পন্দনশীল বলয়ে ভাগ হয়ে যায়। শংকুর কেন্দ্রীয় চক্রটি পিস্টনের মতো এগোতে-পেছোতে পারে, কিন্তু কাগজে ভাঁজ থাকায় বাইরের বলয়গুলি তার স্পন্দনে বিঘ্ন ঘটাতে পারে না; কিনারার কাছের ভাঁজগুলি আবার এঁদের স্পন্দন দমিয়ে রাখে। ভিন্ন ভিন্ন বলয়ের স্পন্দন বিভিন্ন কম্পাংকের স্বনতরঙ্গ উৎপন্ন করে। একটিমাত্র স্বরকুণ্ডলী এবং ছদ, সঙ্গীতের সমগ্র পাল্লা সামলাতে পারে না ব'লে, অনেকসময় একটি দণ্ডচুম্বকের দুই প্রান্তে দুটি স্বরকুণ্ডলী এবং অসমান মাপের দুটি শংকুর ব্যবহার হয়। বড় শংকুতে নিম্ন কম্পাংকের এবং ছোটটিতে উচ্চ কম্পাংকের সংকেতবাহী বিদ্যুৎ-ধারা সাড়া জাগায়।

চিত্র 15.9(*b*)—ঐ লাউড-স্পীকারের বৈদ্যুতিক ও যান্ত্রিক প্রতিসম বর্তনী

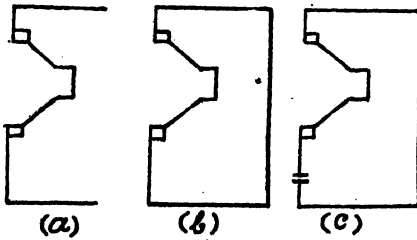
15.9(*b*) চিত্রে দোলকুণ্ডলীর স্পন্দনের বৈদ্যুতিক ও যান্ত্রিক বর্তনীর প্রতিসম চিত্র দেওয়া হয়েছে—তার বাঁ-দিকে স্বরকুণ্ডলীর বৈদ্যুতিক উপাংশগুলি দেখানো হয়েছে; ডানদিকে তারই যান্ত্রিক স্পন্দনের বৈদ্যুতিক উপমিতি নির্দেশিত হয়েছে। এই লাউড-স্পীকারে দক্ষতা কিন্তু কমই, শতকরা মাত্র 1%-এর মতো; তবে 80 থেকে 10,000 চক্র/সে পর্যন্ত কম্পাংকপাল্লায় সুষম সাড়া (চিত্র 15.9*c*) দেওয়া এবং অনেকটা শক্তি-বিকিরণ করার ক্ষমতা, এর সুবিধার মধ্যে পড়ে। 15.9(*d*) চিত্রে একটি দোল-লৌহ (moving iron) লাউড-স্পীকার দেখানো হয়েছে। এখানে স্বরকুণ্ডলীর বদলে আর্মেচারের (*A*) স্পন্দনে শংকু স্পন্দিত হয়। যন্ত্রটি মজবুত হলেও সীমিতসামর্থ্য।

শ্রেণীভেদ : লাউড-স্পীকার থেকে শব্দবিকিরণ সরাসরি হতে পারে, অন্যথায় শিঙার মধ্যে দিয়েও হতে পারে। সরাসরি শব্দবিকিরণে লাউড-স্পীকার-দক্ষতা মোটে 1 থেকে 5%-এর মধ্যেই সীমিত থাকে; দক্ষতা বাড়াতেই শিঙার সংযোজন—এক্ষেত্রে 20 থেকে 50% পর্যন্ত দক্ষতা অর্জন করা সম্ভব।

যে যে ক্ষেত্রে বিকিরিত শব্দক্ষমতা কম হলেই চলে—যেমন বেতারগ্রাহক, দূরদর্শন-গ্রাহক, চৌম্বক-টেপ-পুনরুৎপাদক বা আন্তঃসৌধ সংযোজনব্যবস্থা (intercommunication system) প্রভৃতি—সে-সব জায়গায় প্রত্যক্ষ-বিকিরণ (direct radiation) বা **পিস্টন-জাতীয়** লাউড-স্পীকার ব্যবহার করা যায়; আর রঙ্গালয়, প্রেক্ষাগৃহ, জন-ভাষণ প্রভৃতি যে যে

চিত্র 15.9(c)
দোল-কুণ্ডলী লাউড-স্পীকারে কম্পাংক-সাড়া-লেখ

চিত্র 15.9(d)
দোল-লৌহ লাউড-স্পীকার

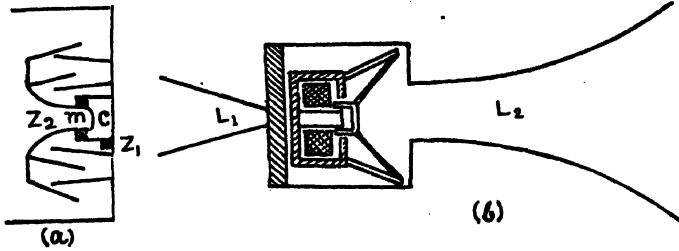
জায়গায় জোরালো শব্দের দরকার, সেই সেই ক্ষেত্রে শিঙা-যুক্ত লাউড-স্পীকারের ব্যবহার হয়।

পিস্টন-জাতীয় বা প্রত্যক্ষ-বিকিরণ শ্রেণীর লাউড-স্পীকারে দক্ষতা এত কম হওয়ার কারণ—স্পন্দকের সামনে ও পেছনের বায়ুতে সমদশায় দুই তরঙ্গমালার উৎপত্তি (চিত্র 11.1) এবং তাদের প্রায় পূর্ণ ব্যতিচার। কাজেই কোন এক দিকে শব্দক্ষেপণ করতে হলে, তার উল্টোদিকের তরঙ্গশ্রেণীর বিলোপ ঘটানো চাই। তাই লাউড-স্পীকারের বেষ্টনী (rim)-বলয়টিকে (১) সমতলীয় নিরস্তকে বা নিবারকে (flat baffle) একেবারে চৌরস (flush) ক'রে বসিয়ে, বা (২) ক্যাবিনেট-বাক্সে বসিয়ে পশ্চাৎ-গামী তরঙ্গমালা অপসারিত করা হয়। নিবারক বড় হলেই তবে সে কার্যকরী হয়। নিবারক ঘুরে স্পন্দকের সামনে থেকে পেছনের দূরত্ব যদি কোন শব্দতরঙ্গের সিকি দৈর্ঘ্যের কম হয়, তাহলে সংশ্লিষ্ট কম্পাংকের কম যে-সব সুরকম্পাংক, তারা সবাই কাটা পড়ে যায়; যেমন 4 ফিট মাপের নিরস্তকের দরুন ছেদ-কম্পাংক প্রায় 70 চক্রের মতো হয়, অর্থাৎ তার নিচের সব কম্পাংক আটকে যাবে। ক্যাবিনেট তিন রকমের (চিত্র 15.10) হয়—পিছন খোলা (a), সব দিক বন্ধ (b), আর একটিমাত্র ছিদ্রযুক্ত (c); বাড়িতে সাধারণ বেতারগ্রাহকের ক্যাবিনেট প্রথম শ্রেণীর; তাতে খোলা মুখের উল্টো দেয়ালে স্পীকার আটকানো

থাকে। তবে চারিদিকে বন্ধ বাক্সই সবচেয়ে বেশী ব্যবহার হয়; তার ভেতরে যদি আবার শব্দশোষী আস্তরণ দেওয়া থাকে তাহলে বিপরীতমুখী তরঙ্গমালার অপসারণ আরও ভালোই হয়। যে দেয়ালে স্পীকার বসানো থাকে তাতে ছোট ছিদ্র (port) থাকলে, স্বল্প কম্পাংকে বিকিরণ সুষ্ঠুতর হয়।

চিত্র 15.10—লাউড-স্পীকার ক্যাবিনেটের শ্রেণীভেদ

শিঙা-যুক্ত স্পীকার: জোরালো শব্দ-বিকিরণের প্রয়োজনে বিদ্যুৎ-ধারা-স্পন্দিত ছদের সঙ্গে শিঙা লাগানো হয়। শিঙার গঠন এমন হওয়া চাই যে, (১) শিঙা-কণ্ঠে বায়ুস্পন্দন শ্রবণ-পাল্লার সব কম্পাংকেই মোটামুটিভাবে সমবেগ হয়—এই উদ্দেশ্যে স্পন্দনী-ছদ-সাপেক্ষে বায়ুকক্ষের গঠন এবং শিঙা-কণ্ঠের প্রস্থচ্ছেদ নির্দিষ্ট মানের হওয়া চাই; (২) শিঙা-মুখের ক্ষেত্রফল এমন হবে যে, শব্দের প্রতিফলন না হয়, অনুনাদ না ঘটে; আর (৩) শিঙার বিস্তরণ-হার (flare) এমন হবে যাতে শব্দশক্তির চরম উত্তরণ (transmission) ঘটে এবং শিঙা-কণ্ঠে বায়ুর চাপের ও বেগের অনুপাত স্থির থাকে। এইসব সর্ত মোটামুটিভাবে সূচক-শিঙারাই পূরণ করতে পারে। অবশ্য শংকু এবং পরাবৃত্তাকার (hyperboloidal) শিঙাও বিশেষ বিশেষ উদ্দেশ্যে ব্যবহৃত হয়। স্পন্দনছদের প্রবল শাব্দ-বাধ এবং বায়ুস্তম্ভের দুর্বল বিশিষ্ট-বাধের মধ্যে সামঞ্জস্যবিধান (matching) ঘটানোই হচ্ছে শিঙার কাজ। ম্যাচিং ট্র্যান্সফর্মারকে শিঙার বৈদ্যুতিক প্রতিসম ব'লে ধরা যায়। শংকু-শিঙা, বিকিরিত শব্দকে নির্দিষ্ট দিঙ্মুখী করে এবং স্পন্দকের উচ্চ-বাধ এবং শংকু-নির্গমের (cone-exit) নিম্নবাধের মধ্যে সূচীমুখী (tapered) উত্তরণ-পথ যোগায়। স্পন্দক এবং শিঙার মধ্যে যোজন—হয় চওড়া, নয় সরু কণ্ঠ মারফতে হয়ে থাকে।

শিঙার বায়ুস্তম্ভ এবং তার প্রান্তস্থ ছদ যুগ্মস্পন্দক। স্পন্দনী-ছদ সাপেক্ষে কণ্ঠমাপ ছোট হলে, স্পন্দনে স্থানচ্যুত বায়ুর সবটাই, শিঙার ভেতর ঢুকে যেত। তার ওপর আবার কণ্ঠের প্রস্থচ্ছেদ ছোট হলে বায়ুর কণাবেগ অর্থাৎ উৎপন্ন চাপও বেশী হবে; তাতে ছদের ওপর ভার বাড়বে, সেই ভার ঠেলে সরাতে ছদকে অনেক বেশী কাজ করতে হবে, ফলে অনুনাদী কম্পাংকগুলি

চৌরস (smooth) হয়ে পড়বে। শিঙাকণ্ঠ যত সরু হবে তার দক্ষতা ততই বাড়বে বটে, কিন্তু প্রস্থচ্ছেদ একটি নিম্ন-ক্রান্তিক মানের তলায় নামতে পারে না। আবার কণ্ঠচ্ছেদ যত ছোট হবে, শিঙাকে ততই লম্বা হতে হবে—নিঃসন্দেহে অসুবিধাজনক উৎপাত। উচ্চ-কম্পাংক বিকিরণ করতে শিঙাশীর্ষ

চিত্র 15.11—ভাঁজ-করা শিঙা

চওড়া হতে হবে এবং খোলা মুখে প্রতিফলন কমাতে ব্যাসকে অন্ততপক্ষে দীর্ঘতম বিকীর্ণ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সিকি-মাপের সমান হতে হবে। সব দিক থেকে বিচার করলে সূচক-শিঙার দক্ষতাই সবার চেয়ে বেশী—নিম্নতম বিকিরণ-কম্পাংকের হিসেব ধ'রে তার দৈর্ঘ্য ও বিস্তারণ-হার নির্ধারিত হয়। লাউড-স্পীকারে শব্দপ্রেরণের চরম দক্ষতা আনতে হলে, শিঙার কণ্ঠচ্ছেদ যতটা ছোট, তার বিস্তারণ-হার যতটা কম আর মুখ যতটা বড় করতে হবে, তাতে শিঙা বেজায় লম্বা হয়ে যাবে ; সেই অসুবিধা এড়াতে শিঙাকে ভাঁজ করা হয় (চিত্র 15.11a)। একই লাউড-স্পীকারে একধারে একটি হ্রস্ব সরল শংকু (L_1), অন্যধারে ভাঁজ-করা দীর্ঘ সূচক-জাতীয় শিঙা (L_2) লাগিয়ে যৌথ শিঙা (চিত্র 15.11b) তৈরী হয়েছে (ছবিতে L_1-এর সঙ্গে স্পীকারের সরাসরি যোগ দেখানো হয়নি) ; শংকুর কাজ উচ্চ-কম্পাংকে বিকিরণ আর সূচকের কাজ নিম্ন-কম্পাংকের শব্দ উত্তরণ। 50 চক্র/সে থেকে 10^4 চক্র পর্যন্ত যৌথ শিঙার সাড়া সন্তোষজনক।

লাউড-স্পীকারের দক্ষতা-বিচার : প্রত্যক্ষ বিকিরক লাউড-স্পীকারকে বৈদ্যুত-শাব্দ সংক্রমক (transducer) বলা চলে ; এতে বৈদ্যুতিক শক্তি বায়ুবাহিত শব্দশক্তিতে রূপান্তরিত হয়। এই যন্ত্রে ধারাবাহী স্বরকুণ্ডলী অরীয় চৌম্বক-ক্ষেত্রে স্পন্দিত হয়, সুতরাং তার ওপর সক্রিয় বলের মান DI_0 হয় (I_0 প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার চরম-মান এবং D বৈদ্যুত-যান্ত্রিক যোজন-গুণাংক)। D-র মান $2\pi rBN$—কুণ্ডলীতে পাক-সংখ্যা N, পাকের ব্যাসার্ধ r এবং B অরীয় চৌম্বকক্ষেত্রের ফ্লাক্স-ঘনত্ব। স্বরকুণ্ডলীর বেগবিস্তার

$$v_0 = F/Z_m = DI_0/Z_m \qquad (১৫\text{-}৫.১)$$

এখানে স্বরকুণ্ডলী-সংলগ্ন ছদ বা পিস্টন অংশের মোট যান্ত্রিক বাধ

$$Z_m = (R_a + R_m) + j\,(X_a + m\omega - s/\omega) \qquad (১৫\text{-}৫.২)$$

এই গণিতীয় ব্যঞ্জকে R_a শাব্দ-বিকিরণ বাধ, R_m যান্ত্রিক রোধ, X_a শাব্দ-বিকিরণ প্রতিক্রিয়তা, m স্বরকুণ্ডলী ও সংলগ্ন ছদের ভর, ω কুণ্ডলী-স্পন্দনাংক এবং s কুণ্ডলীর দার্ঢ্য-গুণাংক। চৌম্বক-ক্ষেত্রে স্বরকুণ্ডলীর দোলনের ফলে কুণ্ডলীতে যে বিদ্যুৎ-চালক বলের আবেশ হয়, তার চরম-মান এবং গতীয় (motional) বাধের মান যথাক্রমে

$$E_0 = Dv_0 = I_0 D^2/Z_m$$

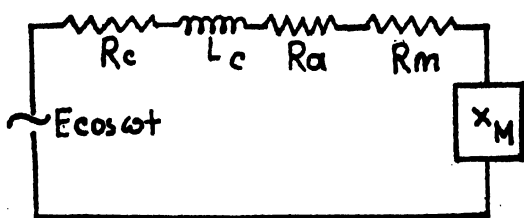
এবং $$Z_M = E_0/I_0 = D^2/Z_m \qquad (১৫\text{-}৫.৩)$$

এই গতীয় বাধকে লাউড-স্পীকারের সরবরাহ (input) বাধও বলে। ১৫-৫.২ সমীকরণ-সাপেক্ষে গতীয়-রোধ এবং প্রতিক্রিয়তা হবে যথাক্রমে

$$R_M = (D/Z_m)^2 (R_a + R_m)$$

এবং $$X_M = -(D/Z_m)^2 (X_a + m\omega - s/\omega) \qquad (১৫\text{-}৫.৪)$$

গতীয় রোধের (R_M) শুধু শাব্দ-রোধাংশটুকুই $[(R_M)_a]$ বৈদ্যুতিক শক্তিকে শাব্দ-শক্তিতে রূপান্তরণ করায়। তার মান

$$(R_M)_a = D^2 R_a / Z_m^2 \qquad (১৫\text{-}৫.৫)$$

চিত্র 15.12—লাউড-স্পীকারের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী

স্পন্দক ছদের গতীয় বাধ ছাড়াও বর্তনীতে স্বরকুণ্ডলীর বৈদ্যুতিক রোধ (R_c) এবং স্বাবেশ (L_c) অন্তর্ভুক্ত থাকবে। সুতরাং দোলকুণ্ডলী লাউড-স্পীকারের বর্তনীর প্রতিসম বাধ হবে

$$Z_E = Z_c + Z_M = R_c + j\omega L_c + D^2/Z_m$$

এই লাউড-স্পীকারের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী 15.12 চিত্রে দেখানো হয়েছে।

লাউড-স্পীকারের শংকুর ক্রিয়া অগ্রাহ্য করলে, বৈদ্যুত-শাব্দ-সংক্রমক হিসাবে, সংজ্ঞামতে যন্ত্রটির দক্ষতা হবে

$$\eta = \frac{(R_M)_a}{R_M + R_e} = \frac{D^2 R_a}{D^2(R_a + R_m) + R_e Z_m^2} \qquad (১৫\text{-}৫.৬)$$

এতে (R_M) এবং $(R_M)_a$-র মান ১৫-৫.৪ এবং ১৫-৫.৫ থেকে বসানো হয়েছে। এতে আবার ১৫-৫.২ থেকে যান্ত্রিক বাধ Z_m-এর মানও এনে বসানো যেতে পারে।

বিকিরিত শাব্দক্ষমতা $I_0^2(R_M)_a$-এর সমান (I_0 স্বরকুণ্ডলীতে প্রত্যাবর্তী ধারার চরম-মান)—অর্থাৎ প্রতিসম বর্তনীতে প্রতি সেকেণ্ডে এই পরিমাণ শক্তির অপচয় হচ্ছে। স্বরকুণ্ডলীতে যদি প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ $E_0 \cos \omega t$ প্রযুক্ত হয়ে থাকে, তাহলে বিকিরিত শাব্দক্ষমতা

$$P_a = I_0^2 (R_M)_a = \frac{E_0^2}{Z_E^2} \cdot (R_M)_a = \frac{E_0^2 D^2 R_a}{Z_E^2 Z_m^2}. \qquad (১৫\text{-}৫.৭)$$

অতএব যান্ত্রিক বাধ কমলে, লাউড-স্পীকারে উৎপন্ন শাব্দ-ক্ষমতা বাড়ে; যান্ত্রিক-অনুনাদের কম্পাংকে Z_m সবচেয়ে কম হয়, তাই দক্ষতা তখন সর্বাধিক।

এবারে তার স্পীকার-শংকুর আচরণ বিবেচনা করলে দেখা যায় যে নিম্ন কম্পাংকে (500 হার্ৎজ পর্যন্ত) গোটা শংকুটাই দৃঢ় বস্তুর মতো স্পন্দিত হয়। তখন তার ভর ও দার্ঢ্যগুণাংক স্পন্দকের সেই সেই রাশির সঙ্গে জুড়ে দিলেই বিকিরণ-বৈশিষ্ট্য নির্ধারণ করা যায়। উচ্চতর কম্পাংকে শংকুটি ভিন্ন ভিন্ন বলয়ে ভাগ হয়ে (ওপরে 'ক্রিয়াপদ্ধতি' অনুচ্ছেদটি দেখ) কাঁপে—তাতে দক্ষতা বাড়ে। নিম্ন কম্পাংকে দক্ষতার অভাব মোটামুটি তিন ভাবে পূরণ করা যায়—(১) স্পন্দকের ব্যাস বাড়িয়ে; (২) শংকুর দার্ঢ্য বাড়িয়ে; (৩) নিরস্তক (baffle) এবং পরিবেষ্টক (cabinet) ব্যবহার ক'রে। তাতে কিন্তু অসুবিধা এই যে, নিম্ন ও উর্ধ্ব কম্পাংকে দক্ষতা-অর্জনের সর্তগুলি পরস্পর-বিরোধী। তাই নিরস্তক এবং পরিবেষ্টক জুড়ে দিয়ে সমগ্র কম্পাংক-পাল্লাতে লাউড-স্পীকারের দক্ষতায় সমতা আনা হয়। বাক্সটি আসলে স্পীকারের কার্যকর দার্ঢ্য এবং অনুনাদ কম্পাংক বাড়ায়; তাতেই দক্ষতা বাড়ে।

১৫-৬. শব্দের ব্যাপ্তি-সম্পর্কিত তাত্ত্বিক আলোচনার রূপরেখা :

এপর্যন্ত আমরা নির্দিষ্ট কয়েকটি শ্রেণীর স্বনক নিয়ে আলোচনা করলাম। এবারে আলোচ্য, স্বনক থেকে শব্দশক্তি কি-ভাবে মাধ্যমে সঞ্চারিত হয়।

স্বনকের সঙ্গে স্থিতিস্থাপক মাধ্যমের সরাসরি সংযোগ থাকলে, তবেই স্পন্দন শক্তির কিছুটা, মাধ্যমে সঞ্চারিত হতে এবং শব্দতরঙ্গের আকারে ছড়াতে পারে। তিনটি প্রাসঙ্গিক প্রশ্নের উত্তর—(১) স্বনক ও মাধ্যমের যোগসূত্র কি, (২) স্বনকের ওপর মাধ্যমের প্রতিক্রিয়া কতখানি, আর (৩) স্বনক থেকে মাধ্যমে শক্তি-সঞ্চার কি-ভাবে হয়—আমরা খুব সংক্ষেপে আলোচনা ক'রবো।

ক. স্বনক এবং মাধ্যমের যোজন-ব্যবস্থা : স্পন্দনকালে স্বনকের স্পন্দিত তল এবং মাধ্যমের মধ্যে কোন বিচ্ছেদ থাকে না ; কাজেই সেই তলের এবং তৎসংলগ্ন মাধ্যম-স্তরে কণাবেগ সমানই ; স্পন্দকতলে কণাবেগই, স্বনক এবং শাব্দক্ষেত্রের মধ্যে যোগসূত্র রচনা করে। এই প্রসঙ্গে **উৎস-সামর্থ্য** (source strength) সবচেয়ে দরকারী রাশি ; স্পন্দকের ক্ষেত্রফল (S) এবং বেগবিস্তারের (U_0) গুণফলকে উৎস-সামর্থ্য (Q)* ব'লে ধরা হয়।

আবার শাব্দক্ষেত্রে স্বনকের সঙ্গে যে রাশি সবচেয়ে বেশী ঘনিষ্ঠ সে হ'ল **শাব্দ তীব্রতা**। এই দুই রাশির মধ্যে সম্পর্ক প্রতিষ্ঠা করতে দরকার, একটি আদর্শ স্বনকের ; তার সরলতম উদাহরণ স্পন্দনশীল গোলক—এটি কোন স্থিতিস্থাপক মাধ্যমে পূর্ণনিমজ্জিত থেকে পর্যায়ক্রমে সংকুচিত ও প্রসারিত হয় এবং নিজ কেন্দ্রবিন্দু-সাপেক্ষে অপসারী সরল দোলজাতীয় গোলকীয় আকারের তরঙ্গমালা উৎপন্ন করতে থাকে।

খ. স্বনকের ওপর মাধ্যমের প্রতিক্রিয়া : এইরকমের উৎস, স্পন্দনকালে মাধ্যমে প্রত্যাবর্তী বল প্রয়োগ করে ; সুতরাং তার ওপরেও সমান এবং বিপরীতমুখী প্রত্যাবর্তী বল প্রযুক্ত হয়। যেকোন আদর্শ বা বাস্তব স্বনকের ক্ষেত্রেই তাই হবে। স্বনকের স্পন্দনে মাধ্যম যে প্রতিক্রিয়াজনিত বাধা প্রয়োগ করে, তাই থেকেই বিকিরণ বাধের উৎপত্তি। স্বনকতলে সক্রিয় প্রতিক্রিয়া বল এবং স্পন্দনশীল তলের বেগ, এদের অনুপাতকে **বিকিরণ বাধ** বলে। এই রাশিটি বল ও বেগের অনুপাত হওয়ায় যান্ত্রিক-বাধের সমধর্মী।

স্পন্দকের তল-বেগ আর তাতে উদ্ভূত মাধ্যমপ্রযুক্ত প্রতিক্রিয়া-বলের মধ্যে স্বভাবতই কালান্তর, সুতরাং দশাভেদ থাকবেই ; কাজেই তাদের অনুপাত জটিল রাশি। এর বাস্তব অংশটি আগের অনুচ্ছেদে আলোচিত বিকিরণ বা শাব্দ রোধ $(R_M)_a$—এরই ক্রিয়ায় শাব্দশক্তির বিকিরণ হয়। এই বিকিরণে বিকিরণ-বাধের অলীক অংশ বা বিকিরণ-প্রতিক্রিয়তার

* এই Q কিন্তু ২-৬.৭ সমীকরণে আলোচিত উৎকর্ষ-অনুপাত নয়।

কোন অবদান নেই ; কেননা তার বিরুদ্ধে উৎস, চক্রের প্রথমার্ধে যতটা কাজ করে, দ্বিতীয়ার্ধে ততটা শক্তিই সে ফেরৎ পায় [প্রত্যাবর্তী ধারা-বর্তনীতে শক্তিহীন (wattless) উপাংশের কথা মনে কর]। এই প্রসঙ্গে লাউড-স্পীকারের ছদের জোরালো বিকিরণ-বাধ এবং বায়ুস্তম্ভের দুর্বল শাব্দ-বাধের মধ্যে সামঞ্জস্য-বিধানে শিঙার ভূমিকা উল্লেখযোগ্য। তার ক্রিয়া দুই বর্তনীর মধ্যে সমতাবিধায়ক (matching) ট্র্যান্স্ফর্মারের মতো (এ কথা আগেই বলা হয়েছে)।

তাহলে দেখা যাচ্ছে যে, বিকিরণ-বাধের ক্রিয়াই স্বনক থেকে মাধ্যমে শক্তিসংক্রমণ ঘটায় ; শক্তিপ্রবাহের কিছুটা, একমুখী বিকিরণ-রোধের ক্রিয়ায় শব্দশক্তি ছড়ায়, কিছুটা বিকিরণ-প্রতিক্রিয়তার দরুন উভয়মুখে আসে যায়, আর বাকিটার তাপশক্তিরূপে অপচয় হয়। তুলনীয়—প্রত্যাবর্তী প্রবাহ চললে তারে একমুখে বিদ্যুৎশক্তি সঞ্চালিত হয়, আশেপাশে পর্যায়ক্রমে চৌম্বক ক্ষেত্রের উৎপত্তি ও বিলোপ হতে থাকে আর জুল-তাপনে অপচিত তাপও উৎপন্ন হয়।

গ. মাধ্যমে শক্তি-সংক্রমণের হার ঃ লাউড-স্পীকারের দক্ষতা-বিচার প্রসঙ্গে এ-সম্বন্ধে আলোচনা হয়েছে। সেই নজির টেনে বলা চলে যে, উৎস যদি পিস্টন-জাতীয় এবং বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় পন্থায় স্পন্দিত হয়, তাহলে তার স্পন্দনবেগ এবং মাধ্যমে শক্তি-সংক্রমণের গড় হার হবে যথাক্রমে

$$U=\frac{DI}{Z_m+Z_r} \text{ এবং } P=U^2R_r=\left(\frac{DI}{Z_m+Z_r}\right)^2 R_r \quad (\text{১৫-৬.১})$$

এখানে স্পন্দকের তলবেগ U, প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার rms মান I, বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় যোজন-গুণাংক D, Z_m এবং Z_r স্পন্দনে যথাক্রমে যান্ত্রিক এবং বিকিরণ-বাধ, আর R_r বিকিরণ-রোধ। ১৫-৬.১ এবং ১৫-৫.৭ তুলনীয়।

১৫-৭. স্বনক—আদর্শ এবং বাস্তবে ঃ

আমরা যে-সমস্ত স্বনকের আলোচনা করেছি, তাদের কর্মদক্ষতার সম্যক্ ধারণা করতে হলে, আগে আদর্শ অর্থাৎ সরলীকৃত স্বনকের উৎস-সামর্থ্য এবং উৎপন্ন শাব্দতীব্রতার মধ্যে সম্পর্কটি জানা চাই ; তার পরে বাস্তব স্বনকের কৃতি (performance) তার কতটা কাছে যেতে পারে, সেই বিচার করা সম্ভব। অসংখ্য স্বনকের মধ্যে আমরা তিন শ্রেণীর আদর্শ উৎস—যথা স্পন্দমান গোলক, শাব্দ যুগ্মক আর পিস্টন—আলোচনা ক'রবো।

ক. স্পন্দমান গোলক ঃ এটি স্পন্দনের সরলতম উৎস এবং ক্রমান্বয়ে সংকুচিত ও প্রসারিত হয়ে মাধ্যমে গোলীয় তরঙ্গ উৎপন্ন করে। স্পন্দন

সরল দোল-জাতীয় হলে, একেত্রে বিক্ষুব্ধ কণার বেগবিস্তার u_m ; ৭-১৪.১ সমীকরণ অনুযায়ী সেই বিন্দুতে শাব্দতীব্রতা হবে

$$I=\tfrac{1}{2}p_m u_m \cos\theta=\tfrac{1}{2}c\rho_0 u_m^2 \cos^2\theta \qquad (১৫-৭.১)$$

[∵ ৬-৪.১১ থেকে $p_m=c\rho_0 u_m$]

গোলকতলে ব্যাসার্ধ বরাবর কণাবেগবিস্তার $(u_r)_m=Q/S=Q/4\pi r^2$ হবে ; কাজেই গোলকতলে শাব্দতীব্রতা হবে

$$I_r=\tfrac{1}{2}\rho_0 c(Q/4\pi r^2)^2\cos^2\theta=\frac{\rho_0 cQ^2\cos^2\theta}{32\pi^2 r^4}$$

$$=\frac{\rho_0 cQ^2\beta^2}{32\pi^2 r^2(1+\beta^2 r^2)} \qquad (১৫-৭.২)$$

[7.14 চিত্রে, $\cos\theta=r\beta/(1+\beta^2 r^2)^{\frac{1}{2}}$]

এই সমীকরণটি স্বনক-সামর্থ্য Q এবং স্বনকতলে শাব্দতীব্রতার মধ্যে সম্পর্ক নির্দিষ্ট করে। অতএব গোলীয় তরঙ্গের কেন্দ্র থেকে x দূরত্বে তীব্রতার মান

$$\frac{I_x}{I_a}=\frac{a^2}{x^2} \text{ বা } I_x=I_a\frac{a^2}{x^2}=\frac{\rho_0 cQ^2\beta^2}{32\pi^2(1+r^2\beta^2)x^2} \qquad (১৫-৭.৩)$$

হবে। তরঙ্গদৈর্ঘ্য-সাপেক্ষে গোলক-ব্যাসার্ধ খুব ছোট ($\lambda \gg a$) হলে, $r\beta(=2\pi r/\lambda)$ নগণ্যই হবে এবং তখন যেকোন বিন্দুতে শাব্দতীব্রতা দাঁড়াবে

$$I_x=\rho_0 c\beta^2 Q^2/32\pi^2 x^2 \qquad (১৫-৭.৪)$$

যে-সব স্বনকের বেলায় উৎস-সামর্থ্য (Q) এবং যেকোন বিন্দুতে শাব্দ-তীব্রতার (I_x) মধ্যে সম্পর্ক এই সমীকরণসম্মত, তাদের **সরল উৎস** বলে। উৎস ছোট গোলক আকারের হলে, পরীক্ষণের ফলে দূর বিন্দুর বেলায় সে সরল উৎসসম ব'লেই প্রমাণিত হয়েছে।

অসীম নিরন্তকে শব্দের উৎস হিসাবে **অর্ধগোলক** বসালে, শব্দতরঙ্গ পেছনে যেতে পারে না (কেননা নিরন্তক পাঁচিলের কাজ করে), কেবল সামনের দিকেই এগোয়। একই জায়গায় রাখা সমব্যাসার্ধের স্পন্দনশীল গোলকের শাব্দক্ষেত্রের সঙ্গে এর কোন প্রভেদ নেই। তবে স্পন্দকতলের ক্ষেত্রফল অর্ধেক হওয়ায়, উৎস-সামর্থ্য $Q'=\frac{1}{2}Q$ আর তীব্রতা

$$I'_x=\rho_0 c\beta^2 Q^2/8\pi x^2 \qquad (১৫-৭.৫)$$

খ. শাব্দ-যুগ্মক (Acoustic doublet)**ঃ** বিপরীত বেগদশায় স্পন্দমান দুটি ছোট্ট সরল উৎস সামান্য তফাতে থাকলে, সমন্বয়টিকে শাব্দ-যুগ্মক বলে (নামটি চৌম্বকবিদ্যা থেকে ধার নেওয়া) ; দুটি বিপরীতধর্মী চৌম্বক বিন্দুমেরু বা স্থিরবৈদ্যুত আধান সামান্য তফাতে রেখে চৌম্বক বা বৈদ্যুত দ্বিমেরু (dipole বা doublet) তৈরী হয়।

শাব্দযুগ্মকের শাব্দক্ষেত্রে কোন বিন্দুতে কণাবেগ, শাব্দচাপ বা তীব্রতা গণনা করলে দেখা যায় যে, তার থেকে শ্রবণবিন্দুর দূরত্ব (x) যদি (ক) উৎপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) তুলনায় বেশ ছোট এবং (খ) যুগ্মক-দৈর্ঘ্যের (l) তুলনায় অনেক বড় হয়, তাহলে শাব্দচাপ (১) কম্পাংকের সমানুপাতিক এবং (২) দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হবে [তুলনীয়ঃ দ্বিমেরুর ক্ষেত্রে চৌম্বক প্রাবল্য $H = M \cos \theta / x^2$] কাজেই শাব্দতীব্রতা x^4-এর ব্যস্তানুপাতিক। তাই নিম্ন কম্পাংকে শাব্দযুগ্মক দুর্বল স্বনক ; তার কারণ, স্পন্দন ধীরে হতে থাকলে এক উৎস-সৃষ্ট উচ্চচাপ অঞ্চল থেকে বায়ু অপর উৎস-জনিত নিম্নচাপ অঞ্চলে চলে আসার সময় পায়, আর তাতে শাব্দচাপ এবং তীব্রতা দুই-ই কমে।

লাউড-স্পীকারের স্পন্দনশীল ছদ দুর্বল স্বনক (এ কথা আগেই বলা হয়েছে), কেননা তার একধারে বায়ুর সংকোচন হলে, একই সঙ্গে অপরধারে প্রসারণ হয়, অর্থাৎ এই ছদ শাব্দযুগ্মক। একই কারণে স্পন্দনশীল তারও দুর্বল স্বনক, সুরশলাকার প্রতিটি বাহুই শাব্দ-যুগ্মক ; প্রত্যেকেই একযোগে বিপরীতমুখী এবং বিপরীত দশায় বৈততরঙ্গমালা উৎপন্ন করে। অধিকাংশ স্বনকই এইজাতীয়।

গ. পিস্টন-স্বনক ঃ স্পন্দমান গোলকের কণাস্পন্দন অরীয় ; বাস্তবে এইজাতীয় স্বনক কিন্তু বিরল। বাস্তব-ঘেঁষা আদর্শ স্বনক পেতে হলে, পিস্টনের চাকৃতি নেওয়া যেতে পারে ; এখানে স্পন্দনমুখ চাকৃতির লম্ব বরাবর থাকে। এও কিন্তু শাব্দযুগ্মক অর্থাৎ দুর্বল উৎস ; কেননা এখানে অগ্রগতি অভিমুখে সংকোচন এবং সঙ্গে সঙ্গে পিস্টনের পেছনে প্রসারণ ঘটবে। লাউড-স্পীকারের ছদ পিস্টন শ্রেণীর স্বনক, কাজেই দুর্বল উৎস ; তাকে সবল করতে তাই, নিরন্তক বা পরিবেষ্টকের দরকার পড়ে। পিস্টন-স্বনককে অসীম নিরন্তকে বসালে শাব্দতরঙ্গের দুই অর্ধের উপরিপাতন হতে পারে না, সুতরাং দৌর্বল্যও আর ঘটে না। তখন উৎসটি একক (singlet) এবং দিঙমুখী হয়ে যায়।

তরঙ্গদৈর্ঘ্য-সাপেক্ষে পিস্টনের পরিধি অনেক ছোট হলে, ক্ষেত্রফল × বেগবিস্তার (SU_0) রাশিটি দিয়ে এর উৎস-সামর্থ্য এবং ১৫-৭.৫ সমীকরণ দিয়ে তার শাব্দ-তীব্রতা নির্ধারিত হয়। পরিধি বড় হলে, ক্ষেত্রটিকে কয়েকটি বলয়ে ভাগ ক'রে নিয়ে প্রতিটিকে সরল উৎস ধরা হয় এবং আলাদা আলাদা ক'রে শাব্দ-তীব্রতায় তাদের অবদান নির্ণয় ক'রে সেগুলি যোগ করা হয়; পন্থাটি আলোকতরঙ্গের দরুন কোন বিন্দুতে তীব্রতা-নির্ণয়ে ব্যবহৃত, ফ্রেনেল-এর **অর্ধ-পর্যায় বলয়মালার** (half-period zones) অনুরূপ। কাজটি বিশেষ দুরূহ এবং স্বন-বিদ্যার অন্যতম অসমাহিত মৌলিক সমস্যা।

a ব্যাসার্ধের পিস্টন থেকে অনেক দূরের ($r \gg a$) কোন বিন্দুতে (r, θ) তীব্রতা-মান হয়

$$I = \frac{\rho c \beta^2 Q^2}{8\pi^2 r^2}\left[\frac{2J_1(x)}{x}\right]^2 \qquad (১৫\text{-}৭.৬)$$

এই সমীকরণে উৎস-সামর্থ্য $Q = \pi a^2 U_0$, $x = a\beta \sin\theta$ এবং

$$2J_1(x) = \left(1 - \frac{x^2}{2^2.2} + \frac{x^4}{4^2.6} - \cdots\right)$$

এখানে $J_1(x)$ প্রথম ক্রমের বেসেল অপেক্ষক এবং তাকে দিঙ্মুখী গুণাংক বলে। নিম্ন কম্পাংকে β এবং কাজেই x-এর মান কমেই যায় এবং রাশিটির মান 1-এর কাছাকাছি আসে ও দিক্-নিরপেক্ষ হয়ে পড়ে। তখন পিস্টন-স্বনকে উৎপাদিত তরঙ্গের তীব্রতা-মান, একই উৎস-সামর্থ্যের গোলীয় তরঙ্গের তীব্রতা-মানের সমান হয়—অর্থাৎ তরঙ্গ তখন সমতলীয় না হয়ে গোলীয় হয়।

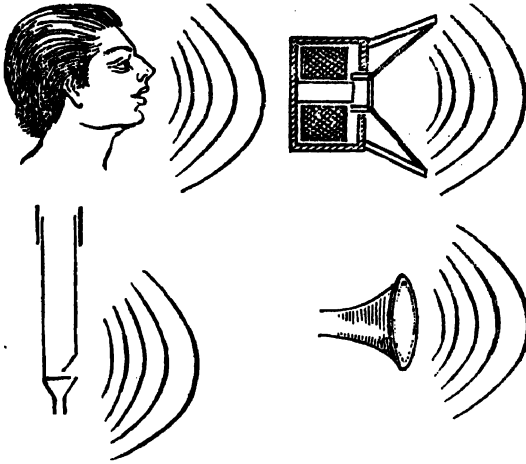
সরল উৎস ঃ আকার-নির্বিশেষে যে স্বনকের দরুন কোন বিন্দুতে তীব্রতার মান ১৫-৭.৪ সমীকরণ দিয়ে নির্ধারিত হয়, তারাই সরল উৎস। স্বনককে কেন্দ্র ক'রে নির্ণেয় বিন্দুর দূরত্বে (x) একটি গোলক টানলে, যতটা শব্দশক্তি তার গোটা তল ভেদ ক'রে যায়, সেটাই স্বনকের গড় শাব্দ-ক্ষমতার মান; অর্থাৎ

$$P = 4\pi x^2 . I_a = 4\pi x^2 \frac{\rho_0 c \beta^2 Q^2}{32\pi^2 x^2} = \frac{\rho_0 c \beta^2 Q^2}{8\pi} \qquad (১৫\text{-}৭.৭)$$

লক্ষণীয় যে, শক্তিব্যাপ্তির গড়-হার শ্রবণবিন্দুর দূরত্ব (x)-নিরপেক্ষ। অবশ্য মাধ্যমে শক্তি-শোষণ অগ্রাহ্য করা হয়েছে।

বিকিরিত তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ), স্বনকের স্পন্দনশীল মাপের (a) তুলনায়

অনেক বড় হলে, উৎসের আকার-নির্বিশেষে ওখান থেকে কিছু দূরেই তরঙ্গরূপ গোলীয় হয়ে যায়, কাজেই তীব্রতা-বিচারে স্বনকটি তখন সরল উৎস। বাস্তব উৎস থেকে যে দূরত্বে তরঙ্গ গোলীয় হয়ে যায় সেই দূরত্বে ও তার বাইরে, তাকেও সরল-উৎস বলা চলে। সে স্বনক গোলক, অর্ধগোলক, শাব্দযুগ্মক বা পিস্টন-জাতীয়, যেকোন শ্রেণীরই হতে পারে।

বাস্তব স্বনক : 15.13 চিত্রে যে ক'টি শাব্দ-বাস্তব উৎস দেখানো হয়েছে তারা সকলেই সরল উৎসের মতো আচরণ করছে। এই আচরণ বিধিসম্মত হতে হলে তিনটি সর্ত পূরণ হওয়া চাই—(১) বিকিরিত তরঙ্গদৈর্ঘ্য উৎসের তুলনায় অনেক বড় হবে ; (২) উৎস থেকে শ্রবণবিন্দুর দূরত্ব বেশ

চিত্র 15.13—কয়েকটি বাস্তব সরল-স্বনক

কয়েক তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সমান হবে ; আর (৩) স্পন্দনী-তল সামগ্রিকভাবে কম্পিত হতে থাকবে।

অনেক বাস্তব স্বনকের বেলাতেই সর্তগুলি অপূর্ণ থেকে যায়—যেমন উৎসের খুব কাছাকাছি, বা বড় বড় বাদ্যযন্ত্র বা উচ্চকম্পাংক স্বনকের ক্ষেত্রে। আবার বড় স্পীকার-শংকুর মতো অনেক স্বনকেই স্পন্দনশীল তলের ভিন্ন ভিন্ন অংশ ভিন্ন ভিন্ন বেগে কাঁপে ; নীতিগতভাবে এক্ষেত্রে তাদের সরল উৎসের সমষ্টি হিসাবে দেখা যায় বটে, কিন্তু ১৫-৭.৬ সমীকরণ প্রসঙ্গে দেখা গেছে যে, এতে গাণিতীয় জটিলতা খুব বেশী।

সরল-উৎস-জাত সব আন্দোলনই কোন নির্দিষ্ট মুহূর্তে সমদশা হবার

কথা, কিন্তু শাব্দযুগ্মকের মতো অনেক স্বনকের স্পন্দনেই বিপরীত দশায় তরঙ্গমালার উৎপত্তি হয়। এই দুই বিষমদশা তরঙ্গমালাকে উপরিপাতিত হতে না দিলে, উৎসকে সরল বা একক ভাবা চলে ; সেই অবস্থা আনতে, উৎসকে হয় অসীম নিরন্তকে, না হয় মাত্র এক-মুখ-খোলা বাক্সে বসাতে হয় —আমরা দেখেছি লাউড-স্পীকারে দু'রকম ব্যবস্থাই প্রচলিত। বড় বড় বাদ্যযন্ত্রের পেটিকা বা শব্দাসন সীমিত নিরন্তকের কাজ করে।

১৮-৭(ক). শক্তি-সংক্রমক (Transducer) :

যার সাহায্যে সংস্থা থেকে সংস্থান্তরে এক রূপের শক্তি অন্য রূপে স্থানান্তরিত করা যায়, তাকে শক্তি-সংক্রমক বলা চলে। এই অধ্যায়ের প্রথম অনুচ্ছেদেই আলোচ্য শক্তি-সংক্রমণের অবতারণা করা হয়েছে। পদার্থবিদ্যা শক্তির রূপান্তর ও সংক্রমণেরই শাস্ত্র—তাদের উদাহরণ অগণ্য—মোটর বা এঞ্জিন, বৈদ্যুতিক ঘণ্টা, তাপ-বৈদ্যুত যুগ্মক (Thermocouple) ইত্যাদি। আগেই আভাষ মিলেছে যে স্বনবিদ্যায় ব্যাতিহারী সংক্রমণ তিন শ্রেণীর হয়—

যান্ত্রিক ⇄ শাব্দ, বৈদ্যুতিক ⇄ শাব্দ, বৈদ্যুতিক ⇄ যান্ত্রিক ⇄ শাব্দ

স্পন্দনশীল তার, ছদ এবং বায়ুস্তম্ভ প্রথম শ্রেণীর, লাউড-স্পীকার ও মাইক্রোফোন দ্বিতীয় শ্রেণীর এবং স্বনোত্তর স্পন্দনে (২০ অধ্যায়) ব্যবহৃত কোয়াৎ'জ পাত বা নিকেল-দণ্ড তৃতীয় শ্রেণীর সংক্রমকের উদাহরণ।

যেকোন সংস্থার যে অংশটুকু শক্তির রূপান্তর ঘটায়, তাকেই **সংক্রামী উপাদান** বলে। বৈদ্যুত-যান্ত্রিক রূপান্তরের নমুনা—প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার সংশ্লিষ্ট চৌম্বক-ক্ষেত্রের হ্রাসবৃদ্ধির ফলে, স-টান প্রচুম্বকীয় ছদের স্পন্দন ; নির্দিষ্ট বিস্তার এবং কম্পাংকপাল্লায় এই স্পন্দন হলে আশেপাশের মাধ্যমে শব্দতরঙ্গ উৎপন্ন হয়—সেটি যান্ত্র-শাব্দ রূপান্তর। শব্দতরঙ্গের প্রত্যাবর্তী চাপভেদের ক্রিয়ায় আর এক স-টান প্রচুম্বকীয় ছদের স্পন্দন (শাব্দ-যান্ত্র রূপান্তর), আর সেই স্পন্দন চৌম্বক-ক্ষেত্রে হলে, উপযুক্ত বর্তনীতে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা আসে—যান্ত্র-বৈদ্যুত রূপান্তর। আলোচিত ক্ষেত্র দুটিতে রূপান্তর-সংক্রমণ বিষমমুখী—এরা যথাক্রমে লাউড-স্পীকার ও মাইক্রোফোনের কার্যনীতি। দুই যন্ত্রেই স-টান ছদ সংক্রামী উপাদান। আর একটি উদাহরণ দেখা যাক। চাপ-বৈদ্যুত ঘটনায় যথাযথভাবে কাটা কোয়াৎ'জ স্ফটিকের পাত সংক্রামী উপাদান—তার ওপরে প্রত্যাবর্তী বৈদ্যুতিক বিভবভেদ প্রয়োগ করলে যান্ত্রিক স্পন্দন ঘটে (বৈদ্যুত-যান্ত্রিক রূপান্তর) ; স্বনোত্তর কম্পাংকপাল্লায় স্পন্দন ঘটলে, যান্ত্রিক স্পন্দন আশেপাশের মাধ্যমে শাব্দচাপ-তরঙ্গ উৎপন্ন করে

(যান্ত্রিক → শাব্দ রূপান্তর); এই তরঙ্গ আর একটি উপযুক্ত পাতের ওপর পড়লে প্রত্যাবর্তী শাব্দ চাপ → যান্ত্রিক স্পন্দন → প্রত্যাবর্তী বৈদ্যুতিক বিভবভেদ, এই পরম্পরায় বিষমমুখী শক্তি-রূপান্তর ঘটবে। প্রতি রূপান্তরণেই শক্তির কিছু অংশ তাপরূপে অপচিত হবেই—কারণ প্রতিটি শক্তি-রূপান্তরেই entropy (বা অকর্মা তাপের পরিমাণ) বাড়ে—একে **রূপান্তর-অপচয়** বলে।

বৈদ্যুতিক, শাব্দ বা যান্ত্রিক সংক্রমকগুলির জন্যে প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনীর উপস্থাপন সম্ভব—এবং সেই উপায়ে তাদের ক্রিয়াবিধি সহজবোধ্য হয়; কিন্তু শিক্ষার এই স্তরে বৈদ্যুতিক বর্তনী-তত্ত্বের সঙ্গে আমাদের পরিচয় অল্প হওয়ায় এই উন্নত প্রযুক্তি-আলোচনা নিরর্থক। ৮ অধ্যায়ে কয়েকটি বিক্ষিপ্ত সংস্থার ক্ষেত্রে এই আলোচনা সংক্ষেপে ও প্রাথমিক স্তরে করা হয়েছে।

১৫-৮. শব্দসন্ধানী বা শব্দগ্রাহী:

আমরা আগেই দেখেছি যে সুর-আর্ক—স্বনক ও শব্দগ্রাহী দুই হিসাবেই কাজ করতে পারে। লাউড-স্পীকার উল্টোমুখে কাজ করলে, মাইক্রোফোন হিসাবে কাজ করে এবং সেটি শব্দগ্রাহী। গীতিশিখা স্বনক এবং সুবেদী (sensitive) শিখা শব্দগ্রাহী হতে পারে। কোয়াৎ´জ পাত এবং স-টান ছদ যে ব্যতিহারী আচরণে শব্দ-উৎস এবং শব্দগ্রাহী হিসাবে কাজ করে, সে কথাও আগে বলা হয়েছে।

এরা ছাড়া শব্দগ্রাহী হিসাবেই মাত্র যাদের ব্যবহার হয় তাদের মধ্যে সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ হচ্ছে আমাদের কান; পরে শারীরস্বন অধ্যায়ে আমাদের বাক্‌যন্ত্রের আলোচনার পরেই কানও আলোচিত হবে—এরা যথাক্রমে শারীরতত্ত্বীয় স্বনক এবং গ্রাহক। অনুনাদী শব্দসন্ধানী হিসাবে বহুল ব্যবহৃত হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ অনুনাদকের আলোচনা করা হয়েছে।

ক. সাধারণ শ্রেণীবিভাগ: মাধ্যমবাহিত শব্দের সন্ধান বা গ্রহণ নানা এবং বিচিত্র সর্তাধীন। গ্রাহক-নির্বাচনে নানারকম বৈশিষ্ট্য বিচার করা দরকার হয়; যেমন—শব্দতরঙ্গের বৈশিষ্ট্য (যথা—সরণবিস্তার, কম্পাংক বা গড়ন), শাব্দবাহী মাধ্যমের বৈশিষ্ট্য (যেমন—কণাবেগ, ঘনত্ব, স্থিতি-স্থাপকতা, বিকিরণ বাধ), শব্দশক্তির অভিপ্রেত পরিণতি (যান্ত্রিক বা বৈদ্যুতিক)—এতগুলির এক বা একাধিক ব্যাপার সংশ্লিষ্ট থাকতে পারে। কাজেই স্বনকের চূড়ান্ত বা সম্যক্ শ্রেণীভেদ সম্ভব নয়।

উদাহরণ হিসাবে বলা যায়, যে গ্রাহক বায়ুমাধ্যমে উপযুক্ত, সে জলে বা

মাটির নীচে অচল; যে গ্রাহক 100 চক্রের কম্পাংক-সন্ধানে খুবই পটু, সে 10^4 চক্রে মোটেই নয়। দূরাগত ক্ষীণ শব্দসংকেত-গ্রহণে গ্রাহককে কম্পাংক-সুবেদী হতে হবে, তরঙ্গরূপ বিকৃত হলে যায় আসে না; অথচ শব্দের পুনরুৎপাদনে তরঙ্গরূপ অবিকৃত থাকাই অভিপ্রেত, কম্পাংক-সংবেদন গৌণ লক্ষ্য। প্রথম ক্ষেত্রে গ্রাহক অনুনাদী (সংবেদী), দ্বিতীয় ক্ষেত্রে পরবশ (বিশ্বস্ত)—এদের দুয়ের উদ্দেশ্য ভিন্ন। আবার গ্রাহকেরা চাপ-সুবেদী ও সরণ-সুবেদী এই দুই শ্রেণীতে বিভক্ত হতে পারে; এখানেও উদ্দেশ্য ভিন্ন, কারণ দুই সর্ত পরস্পর বিরোধী; কেননা শাব্দতরঙ্গে যেখানে চাপভেদ চরম, যেখানে সরণ-বিস্তার নেই এবং বিপরীতক্রমে।

শব্দগ্রাহীমাত্রেই শাব্দক্ষেত্রে অল্পবিস্তর বাধার তথা বিকৃতির কারণ। কেননা সে, বাধা দিয়ে কিছু শক্তি প্রতিফলিত এবং বিক্ষিপ্ত করে, স্পন্দিত হয়ে কিছুটা শোষণ বা আত্মসাৎ করে, সংক্রমকের ভূমিকায় কিছু অপচয় করে, বাকীটা রূপান্তরিত করে। গ্রাহক দক্ষ বা পটু হতে হলে আপতিত শক্তির বেশী ভাগই রূপান্তরিত হওয়া চাই। শব্দগ্রহণ ব্যাপারটাকে আসলে এক যান্ত্রিক স্পন্দনের অন্য যান্ত্রিক বা বৈদ্যুতিক স্পন্দনে রূপান্তরণ বলা চলে; যেমন, বক্তার কণ্ঠস্বর বায়ুতে যে অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন ঘটায় তা টেলিফোন-প্রেরকে প্রথমে ছদের অনুপ্রস্থ যান্ত্রিক স্পন্দনে এবং তারপর মাইক্রোফোনের ক্রিয়ায় বৈদ্যুতিক স্পন্দনে রূপান্তরিত হয়।

বৈদ্যুতিক শব্দগ্রাহীদের আবার অনেকসময় প্রত্যক্ষ এবং পরোক্ষ শ্রেণীতে ভেদ করা হয়। Bell-উদ্ভাবিত বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় টেলিফোন-প্রেরক প্রথম শ্রেণীভুক্ত, সে বৈদ্যুতিক ডায়নামোর নীতিতে শব্দ তথা যান্ত্রিক স্পন্দনশক্তিকে সরাসরি বৈদ্যুতিক দোলনশক্তিকে পরিণত করে। কার্বন-মাইক্রোফোন দ্বিতীয় শ্রেণীভুক্ত—তার কাজ কতকটা বৈদ্যুতিক রিলের মতোই, দুর্বল বৈদ্যুতিক স্পন্দনীধারাকে জোরালো ক'রে তোলা। অনেক গ্রাহক আবার শব্দতরঙ্গের সরণ বা চাপভেদের বিবর্ধন ঘটায়—যেমন তপ্ত-তার মাইক্রোফোন—এরা বৈদ্যুতিক ট্র্যান্‌স্‌ফর্মার বা যান্ত্রিক লেভারের সঙ্গে তুলনীয়।

খ. কার্যকরী নীতি: শব্দতরঙ্গে যতগুলি পরিবর্তনশীল প্রাচল সম্ভব (যথা—কণার সরণ, বেগ বা ত্বরণ, কিংবা মাধ্যমের চাপভেদ, ঘনত্বভেদ বা উষ্ণতাভেদ), ততগুলি পদ্ধতিতেই তরঙ্গ থেকে শক্তি আহরণ করা যায়; তবে কণাসরণ এবং মাধ্যমের চাপভেদই কাজে বেশী লাগানো হয়। চাপগ্রাহীর সামান্য হলেও সরণ থাকবেই, আবার সরণ বা বেগগ্রাহী সামান্য চাপভেদ ছাড়া

সক্রিয় হবে না। এই দুয়ের মধ্যে তফাৎ, কতকটা বিদ্যুৎ-ধারায় ভোল্টমিটার (বৈদ্যুতিক চাপভেদমাপী) এবং অ্যাম্‌মিটারের (বৈদ্যুতিকধারা বা আধানমাপী) মধ্যে পার্থক্যের মতো [কেননা ভোল্টমিটার বিনাধারায়, অ্যাম্‌মিটার বিনা বিভবভেদে অচল]। তপ্ত-তার মাইক্রোফোন (§১৫-৯) সরণ বা বেগগ্রাহীর উদাহরণ; ধারক-মাইক্রোফোন (§১৫-১২) বা কোয়ার্ৎজ স্পন্দক, দক্ষ চাপগ্রাহীর উদাহরণ।

গ. **দক্ষতা-বিচার** ঃ যেকোন শব্দগ্রাহীর সংক্রামী উপাদানের স্পন্দনকে তাত্ত্বিকভাবে স্প্রিং-নিয়ন্ত্রিত ভরের মন্দিত পরবশ স্পন্দন ব'লে ধরা যেতে পারে। তাহলে আমাদের পূর্বপরিচিত ৩-৪.১ সমীকরণ

$$m\ddot{x}+r\dot{x}+sx=F\cos pt$$

এখানে প্রযোজ্য। তার সমাধান এবং তাৎপর্যও আমাদের জানা। গ্রাহক-মাত্রেরই দমন-গুণাংক ($r/m=2k$), দুটি রাশির সমষ্টি, বহির্দমন (r_e) এবং অন্তর্দমন (r_i)। এরা দুটিই শক্তিক্ষয় ঘটায়—প্রথমটি গ্রাহককৃত পুনর্বিকিরণ এবং দ্বিতীয়টি গ্রাহকের শক্তি-আহরণজনিত ক্ষয়।

এই প্রসঙ্গে অন্তর্দমনজনিত ক্ষয়ই আমাদের আলোচ্য, তার মান $\frac{1}{2}r_i\dot{x}_m{}^2$; এখন ৩-৬.৪ক সমীকরণ থেকে

$$\dot{x}_m{}^2=v_m{}^2=\frac{F^2}{[r^2+(m\omega-s/\omega)^2]}=\frac{\omega^2f^2}{[(\omega^2-\omega_0{}^2)^2+4k^2\omega^2]}$$

সুতরাং অন্তর্দমনের দরুন শক্তি-শোষণের গড় সময়-হার

$$\overline{P}=\tfrac{1}{2}r_i\dot{x}_m{}^2=\frac{r_i\omega^2f^2}{2[(\omega^2-\omega_0{}^2)^2+4k\omega^2]} \qquad (১৫\text{-}৮.১)$$

গ্রাহকের শক্তি-আহরণী ক্ষেত্রতল S' এবং আপতিত শাব্দতীব্রতা I হলে

$$\overline{P}=I\times S'=\tfrac{1}{2}\frac{p_m{}^2}{\rho_0c}S' \quad [৬\text{-}৬.২ \text{ সমীকরণ}] \qquad (১৫\text{-}৮.২)$$

অনুনাদী গ্রাহকে $\omega=\omega_0$; অতএব

$$\overline{P}=r_if^2/8k^2=\tfrac{1}{2}r_iF^2/(r_e+r_i)^2 \qquad (১৫\text{-}৮.৩)$$

যদি দুই দমনাংক r_e এবং r_i সমান হয়, তাহলে চূড়ান্ত হারে শক্তির শোষণ বা আহরণ হয়; অর্থাৎ

$$P_m=F^2/8r_i=p_m{}^2S'/4r$$
$$x_m=\tfrac{1}{2}F/\omega_0r_i=p_mS'/\omega_0r \quad (r=2r_i \text{ বা } 2r_e) \qquad (১৫\text{-}৮.৪)$$
$$\dot{x}_m=\tfrac{1}{2}F/r_i=p_mS'/r$$

অতএব গ্রাহকের অন্তর্দমন-গুণাংকের মান যদি অবমমাত্রা এবং বহির্দমন-গুণাংকের সমান হয় তবেই অনুনাদী গ্রাহক চূড়ান্তহারে শক্তি আহরণ করে ; তাই এই ধরনের গ্রাহক তৈরী করতে এই দুই সর্তপূরণে সজাগ দৃষ্টি রাখা চাই। প্রসঙ্গক্রমে, এই সম্পর্কগুলি অপরিবর্তিতভাবেই বৈদ্যুতিক বর্তনীতে প্রযোজ্য।

যতটা শক্তি গ্রাহক আহরণ করে তার কিছুটা কার্যকরী (utilised) হয় আর বাকিটা ঘর্ষণ, সান্দ্রতা, ঘূর্ণী-উৎপাদন প্রভৃতি কারণে নষ্ট (wasted) হয়। এই শক্তিক্ষয়কে, যথাক্রমে r_u এবং r_w দমন-গুণাংকজনিত ধ'রে নিলে অনুনাদী গ্রাহকে শক্তি-শোষণের গড় হার (১৫-৮.৩) থেকে হবে

$$\overline{P}=\tfrac{1}{2}\cdot\frac{F^2.r_u}{(r_u+r_w+r_e)^2} \qquad (১৫-৮.৫)$$

গ্রাহকের মোট দক্ষতা বা নৈপুণ্যের চরম-মান বার করতে $\overline{P}$-কে r_u-এর সাপেক্ষে অবকলন ক'রে শূন্যের সঙ্গে সমীকৃত করতে হয় ; করলে, চরম দক্ষতার সর্ত হিসাবে $r_u=r_e+r_w$ পাই। এই মান 50% পর্যন্ত হতে পারে।

১৫-৯. তাপীয় শব্দগ্রাহী : ক. সুবেদী শিখা :

১৫-৪(গ) অনুচ্ছেদে গীতিশিখার ক্রিয়া আমরা দেখেছি ; সেক্ষেত্রে প্রত্যাবর্তী তাপনক্রিয়া চাপভেদ ঘটিয়ে শব্দ উৎপন্ন করে ; বিপরীত ক্রিয়ায় কেমন ক'রে শব্দতরঙ্গের প্রত্যাবর্তী চাপভেদে জ্বলন্ত গ্যাসশিখা সাড়া দেয় তাও আমরা আগেই [§৯-২(৪)] দেখেছি।

সূচীমুখ বা স্বল্পব্যাসের (0.5 মিমি) ছিদ্র থেকে উচ্চচাপে নির্গামী দাহ্য গ্যাসের জ্বলন্ত শিখার মূলে চাপ নিয়ন্ত্রণ ক'রে তাকে ক্ষীণ অথচ দীর্ঘ (10″ মতো) শিখায় পরিণত করা যায়। চাপের এই মান ক্রান্তিক ; আর একটু চাপ বাড়ালেই শিখা চঞ্চল এবং অস্থির হয়ে ওঠে। ঠিক এই সর্তাধীনে শিখা উচ্চতর কম্পাংকের সুবেদী-নির্দেশক হয়। টিন্ড্যাল এই-জাতীয় শিখা সম্পর্কে বিস্তারিত গবেষণা ক'রে সিদ্ধান্ত করেছেন যে, শিখা যত দীর্ঘ হবে ততই শব্দ-সন্ধানে তার দক্ষতা বাড়বে। গোটা স্বনকম্পাংক পাল্লাতেই এমন কি স্বনোত্তর ($> 10^5$ হার্ৎজের) পাল্লাতেও সুবেদী শিখা শাব্দনির্দেশকের কাজ করতে পারে। উচ্চ-কম্পাংকে খুব ক্ষীণ শব্দও এই শিখাকে বিচলিত করতে পারে। গ্যাস না জ্বালিয়ে তার সূক্ষ্ম ছিদ্র-নিঃসারী

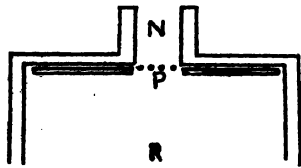
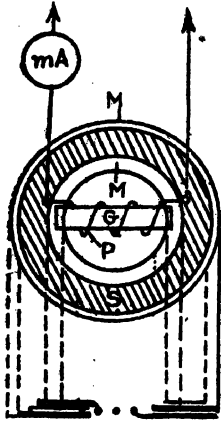
ধারায় রঙীন ধোঁয়া দিয়ে একই ভাবে শব্দনির্দেশনা সম্ভব। বিজ্ঞানী আন্দ্রাদ-এর মতে, শব্দবাহী বায়ু সাপেক্ষে দাহ্য-গ্যাসের অনুপ্রস্থ আপেক্ষিক গতিই, শিখার সুবেদিতার কারণ। গ্যাসস্রোতে যে ঘূর্ণীর সৃষ্টি হয় তাদের বিদ্যুৎ-ধারা-বাহী ঋজু তারের বেষ্টনী চৌম্বক বলরেখার মতোই দেখায়।

ক্যোনিগ-এর চাপমান ক্যাপস্যুল : একটি ছোট কুঠরীর মাঝখানে পাতলা রবারের পর্দা দিয়ে তাকে দু'ভাগ করা থাকে। একটা ভাগে যুক্ত লম্বা রবারের নলের মুখে চোঙা লাগানো থাকে। সেই চোঙা শব্দতরঙ্গসন্ধানী এবং শব্দ পর্দাটিকে কাঁপায়। অপর ভাগে দাহ্য-গ্যাস সরবরাহ ক'রে একটি ছোট সরু নলের মুখে ছোট্ট শিখা জ্বালানো থাকে। পর্দার কম্পনে গ্যাস-চাপ বদলাতে থাকে এবং দীপশিখা ছোট-বড় হতে থাকে ; একটি ঘূর্ণমান চতুর্ভুজ দর্পণের সাহায্যে এই অস্থির দীপশিখার নর্তন দেখা যায়। শব্দসন্ধানী হিসেবে আগে এর যথেষ্ট ব্যবহার হ'ত।

খ. তপ্ত-তার মাইক্রোফোন : বড় একটি হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকের কণ্ঠনলে বিদ্যুৎ-ধারা-তপ্ত সরু একটি তার বসিয়ে এই সরণ-গ্রাহী শব্দসন্ধানী যন্ত্রটি, বিজ্ঞানী টাকার-এর হাতে প্রথম মহাযুদ্ধের সময়ে শত্রুপক্ষের কামানের সন্ধানের চেষ্টা থেকে, উদ্‌ভাবিত হয়েছিল। পরে ক্রমান্বয়ে উন্নত এবং মার্জিত হয়ে এই অত্যন্ত সুবেদী শব্দসন্ধানীটি বর্তমানে শাব্দতীব্রতা-মাপন, মিশ্র শব্দের বিশ্লেষণ, শব্দবেগ-নির্ণয়, অবস্বন স্পন্দনের অস্তিত্ব-সন্ধান, দূরাগত দুর্বল শব্দের উৎপত্তিস্থল-নির্দেশ, বায়ুগতি-সম্পর্কিত গবেষণা প্রভৃতি বহুবিধ কাজে লাগানো হচ্ছে।

15.13 চিত্রে ওপরে তপ্ত-তারের সজ্জা এবং নিচে সংশ্লিষ্ট অনুনাদকে সেটি বসানোর ব্যবস্থা দেখানো হয়েছে। $300\,\Omega$ রোধের এবং 3×10^{-4} সেমি ব্যাসার্ধের একটি প্ল্যাটিনামের তার বা জালিকে (P) কাচদণ্ডে (G) জড়ানো হয় ; তারের দুই প্রান্ত খুব পাতলা রূপোর পাতে (S) ঝালানো (soldered) থাকে। কাচদণ্ডটি একটি অভ্রবলয়ের (M) গোল ছিদ্রের ওপর দিয়ে ফেলা থাকে। $30\,mA$ বিদ্যুৎ-ধারা তারটিকে প্রায় 400° সে উষ্ণতায় অতি সামান্য লাল অবস্থায় রাখে। সমগ্র এই সজ্জাটি পিতলের একটি হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ অনুনাদকের কণ্ঠনলের (N) শেষে বসানো হয়। অনুনাদকের (R) গায়ে ছোট ছোট ছিদ্র ; ভেতরের বায়ুর সঙ্গে বাইরের সংযোগ রেখে দীর্ঘস্থায়ী অনুনাদ এড়াতেই এই ব্যবস্থা করা হয়।

অনুনাদকের স্বকীয় কম্পাংক, তার আয়তন (V) এবং কণ্ঠনলের দৈর্ঘ্য (l) ও প্রস্থচ্ছেদ (S) দিয়ে নির্ধারিত হয়। সংকোচন তথা শব্দতরঙ্গ যথাযথ কম্পাংকের হলে, কণ্ঠনলের বায়ুতে অনুনাদী স্পন্দন ঘটায়। তাতে সেই বায়ুস্তরে প্রত্যাবর্তী সরণ-প্রবাহ হয়ে তপ্ত তারটিকে ঠাণ্ডা করে। লক্ষ্য কর যে, এখানে ব্যাপারটি থার্মো-ফোনের ক্রিয়া-পদ্ধতির বিপরীত বা ব্যতিহারী ঘটনা। তপ্ত তারটি একটি প্রতিমিত (balanced) হুইটস্টোন-বর্তনীর অঙ্গ; ঠাণ্ডা হলেই এর রোধ কমে গিয়ে বর্তনী অপ্রতিমিত হয়; ফলে, প্রবাহনির্দেশী Einthoven-তন্ত্রী গ্যালভ্যানোমিটারে সামান্য বিক্ষেপ ঘটে—বিক্ষেপ শাব্দতীব্রতার অনুপাতী, মাপা হয় অণুবীক্ষণের সাহায্যে।

চিত্র 15.13—তপ্ত-তার মাইক্রোফোন

আপতিত শব্দতরঙ্গ, রোধের এক স্থিরমান এবং এক সামান্য মানের প্রত্যাবর্তী ভেদ ঘটায়; দ্বিতীয় শ্রেণীর ভেদ কিন্তু বর্ধিত না ক'রে মাপা যায় না; এই ভেদ, খুবই মৃদু বা অবস্বন স্পন্দন সন্ধানের কাজে লাগে। রোধের স্থিরমান হ্রাস (δR_1) বায়ুবেগের বিস্তারের বর্গের (v^2) আনুপাতিক আর প্রত্যাবর্তী পরিবর্তন (δR_2) স্বল্পবিস্তার প্রত্যাবর্তী বায়ুবেগের বর্গের $(v^2 \sin^2 \omega t)$ আনুপাতিক অর্থাৎ প্রথম পরিবর্তন শাব্দতীব্রতার এবং দ্বিতীয়টি স্পন্দনবিস্তারের বর্গের $(v = \omega a)$ আনুপাতী। তাদের যথাক্রমে সরাসরি হুইটস্টোন-বর্তনীতে এবং একটি নিম্ন-কম্পাংক ভাল্‌ভ-সম্প্রসারক বর্তনীতে মাপা যায়। রোধের অবশ্য তৃতীয় এক পরিবর্তনও (δR_3) হয়—$v \cos 2\omega t$-র সমানুপাতিক, কিন্তু তার মান নগণ্য।

বিজ্ঞানী বয়েজ যৌগ-অনুনাদক ব্যবহার ক'রে যন্ত্রটির সাড়া আরও বহুগুণ সূক্ষ্মতর করতে পেরেছেন। এতে মাইক্রোফোনের কণ্ঠটি একটি ছোট ফুটোর মধ্যে দিয়ে একটি এক-মুখ-খোলা নলের মধ্যে ঢুকিয়ে দেওয়া হয়; তার ফলে দুটি অনুনাদী সুর পাওয়া যায় এবং তাদের কম্পাংকভেদ দুই অনুনাদকের আয়তনের ওপর নির্ভরশীল; কণ্ঠটি দুই অনুনাদকের বায়ুস্তরের যোগসূত্র

হওয়ায় সেখানে স্পন্দনশীল বায়ুর কণাবেগ অনেকটাই বাড়ে আর তপ্ত তারটি সেইখানেই রাখা থাকে। এর সাহায্যে নানা গোলমালের মধ্যেও দূরাগত অতি মৃদু শব্দের সন্ধান সম্ভব হয়েছে। অবস্বন স্পন্দন সন্ধানেও এর দক্ষতা যথেষ্ট; কেননা তাপীয় প্রভাবে সক্রিয় ব'লে এর সাড়ায় সামান্য বিলম্ব ঘটে —তাই কম্পাংক যত কমে, এর সুবেদিতাও তত বাড়ে।

১৫-১০. মাইক্রোফোন: শাব্দ-বৈদ্যুত রূপান্তরক:

শব্দগ্রাহী হিসাবে যন্ত্রটি অপ্রতিদ্বন্দ্বী, অত্যন্ত জনপ্রিয় এবং বৈচিত্র্যময়। Microphone কথাটির অভিধানগত অর্থ—অতি মৃদু শব্দ। যেকোন বিস্তার বা কম্পাংকের শব্দতরঙ্গ এই যন্ত্রটির স-টান ঝিল্লীর ওপর প'ড়ে পরিবর্তী বা প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ উৎপন্ন করে; সেই ভেদ বা পরিবর্তনচক্র স্পন্দনের অনুগামী এবং বদ্ধ বর্তনীতে, হয় স্থিরমান বিদ্যুৎ-ধারার বিস্তারে ভেদন (modulation) ঘটায়, না হয় সরাসরি প্রত্যাবর্তী প্রবাহ উৎপন্ন করে। স্পন্দন যত দুর্বলই হোক, তাকে ভাল্‌ভের সাহায্যে দরকারমতো সম্প্রসারিত ক'রে নিয়ে লাউড-স্পীকারে সরবরাহ করা সম্ভব। বস্তুত এই সম্প্রসারক ভাল্‌ভ-বর্তনীর কল্যাণেই আধুনিক মাইক্রোফোনের বিস্ময়কর ও বৈচিত্র্যময় কার্যকারিতা সম্ভব হয়েছে। মাইক্রোফোনের ছদের স্পন্দন যখন দিষ্ট প্রবাহে ভেদন আনে তখন তার ক্রিয়া বৈদ্যুতিক রিলের মতো, আর যখন প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ ঘটায় তখন তার ক্রিয়া বৈদ্যুতিক ডায়নামোর মতো ব'লে মনে করা যায়।

শব্দ-সংরক্ষণের (recording) প্রতিটি পন্থায়, যেমন যান্ত্রিক উপায়ে গ্রামোফোন রেকর্ডে, চৌম্বক উপায়ে টেপে বা আলোকভেদন উপায়ে চলচ্চিত্রের ফিল্‌মে, মাইক্রোফোনই প্রথম সোপান; দূরভাষণ (telephony) বা সম্প্রচারের (broadcasting) বেলাতেও তাই। কারণ বৈদ্যুতিক বর্তনীতে ইচ্ছামতো পরিবর্তন বা বৈচিত্র্য আরোপ করার সম্ভাবনা সীমাহীন; বৈদ্যুতিক বিবর্ধক ভাল্‌ভের কল্যাণে যেকোন মৃদু শব্দকে শ্রবণগোচর করা বা অসংবেদী স্পন্দককে কার্যকর করা খুবই সহজ। বিদ্যুৎ-বর্তনীতে স্পন্দনদশার সামঞ্জস্য-বিধান সহজ ব'লে দুটি ভিন্ন ভিন্ন গ্রাহকের সাড়ার সদিশ্‌-সংযোগ সম্ভব। যেকোন শব্দের কম্পাংক বা তীব্রতা বৈদ্যুতিক পদ্ধতিতে মাপা সহজ। কাজেই শাব্দশক্তিকে বৈদ্যুতিকে রূপান্তরণ বা সংক্রমণ খুবই আকর্ষণীয় সহজ এবং কার্যকরী ব্যবস্থা।

ক. **বাঞ্ছিত বৈশিষ্ট্যাবলী :** আপতিত তরঙ্গের প্রত্যাবর্তী শাব্দচাপের ক্রিয়ায় মাইক্রোফোনের ছদ কাঁপতে থাকে এবং সেই স্পন্দন ছদসংশ্লিষ্ট বৈদ্যুতিক বর্তনীতে পরিবর্তী বা প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ উৎপন্ন করে; সম্প্রসারক ভাল্‌ভ দরকারমতো এই বিভবভেদকে বিবর্ধিত করে। মাইক্রোফোনের এই ক্রিয়াপরম্পরা সুষ্ঠুভাবে চলতে হলে যন্ত্রটির নিম্নলিখিত বৈশিষ্ট্যগুলি থাকা দরকার—

(১) **সংবেদিতা** (sensitivity) **:** মুক্ত বা খণ্ডিত মাইক্রোফোন-বর্তনীতে এককমাত্রা শাব্দচাপ যতখানি বিভবভেদ সৃষ্টি করতে পারে তাকেই মাইক্রোফোনের সাড়ার (response) মাপ ব'লে ধরা হয়। এক্ষেত্রে কার্য/কারণ অনুপাত অর্থাৎ খণ্ডিত বর্তনীতে উৎপন্ন বিভবভেদের বিস্তার (E_0) এবং শাব্দচাপবিস্তার (p_m) এই দুয়ের অনুপাতই মাইক্রোফোনের সংবেদিতা $(M_R = E_0/p_m)$ ব'লে ধরা হয়। একে কোন নির্দিষ্ট মানক শাব্দ-প্রাবল্য-স্তর সাপেক্ষে **ডেসিবেল** (§ ১৭-৭) এককে প্রকাশ করা যায়; সেই নির্দিষ্ট মানক প্রাবল্যস্তরকে এক ভোল্ট/ডাইন/বর্গ-সেমি ধরলে, সাড়ার মান হবে

$$n\ (\text{ডেসিবেল}) = 20\,(\log_{10} M_R - \log_{10} 1)$$
$$= 20 \log_{10} M_R$$

স্বভাবতই মাইক্রোফোনের বেশী সংবেদিতাই কাম্য।

(২) **বিশ্বস্ততা** (fidelity) **:** এই বৈশিষ্ট্যটিও কাম্য। আপতিত শব্দের কম্পাংকনির্বিশেষে যন্ত্রের সাড়া যদি অপরিবর্তিত থাকে এবং সেই সাড়া যদি শাব্দচাপের আনুপাতিক হয়, তাহলে মাইক্রোফোনের বিশ্বস্ততা বেশী মনে করা হয়। এক্ষেত্রে কম্পাংক-সাড়া-লেখ মোটামুটিভাবে কম্পাংক-অক্ষের সমান্তরাল, অর্থাৎ চৌরস (flat) হবে। পরে আলোচিত প্রতিটি মাইক্রোফোনেরই এই লেখচিত্র দেখানো হয়েছে এবং দেখা যাবে যে, এই কাম্য সর্তটি থেকে প্রত্যেকেরই অল্পবিস্তর বিচ্যুতি রয়েছে।

(৩) **তীব্রতা- বা চল-পাল্লা** (dynamic range) **:** উৎপন্ন বিভবভেদ আপতিত তরঙ্গের যতটা তীব্রতা-পাল্লা জুড়ে তার শাব্দচাপ বা কণাবেগের আনুপাতিক থাকে, তাকেই মাইক্রোফোনের চল-পাল্লা বলে; স্বভাবতই বিস্তারিত চল-পাল্লাই বাঞ্ছনীয়। দুর্বল শব্দের ক্ষেত্রে স্বকীয় অপস্বর এবং প্রবল শব্দে সহনীয় সমমেল-বিকৃতি, মাইক্রোফোনের এই দুই দোষ, চল-পাল্লাকে সীমিত রাখে।

খ. এবারে আমরা মাইক্রোফোনের **অপছন্দসই বৈশিষ্ট্যগুলি** আলোচনা ক'রবো।

(১) **স্বকীয় অপস্বর** (self-noise)ঃ টেলিফোনের গ্রাহকে কান রাখলেই মাঝে মাঝে নানারকম কড়্‌কড়্‌ শব্দ শোনা যায়; শব্দতরঙ্গ না পড়লেও এইরকম শব্দ সব মাইক্রোফোনেই অল্পবিস্তর শোনা যায়; তাকেই স্বকীয় অপস্বর বলে। ছদ-সংলগ্ন বায়ুকণাগুলির এবং মাইক্রোফোন-বর্তনীতে রোধের মধ্যে অণুগুলির তাপজ অক্রমগতির ফলে ছদের যে স্পন্দন হয়, তাতেই এই শব্দের উৎপত্তি। আপতিত শব্দতরঙ্গের অনুপস্থিতিতে মাইক্রোফোন-বর্তনীর দুই মুক্তপ্রান্তে যে বিভবভেদ থাকে তাই-ই স্বকীয় অপস্বরের পরিমাপ।

(২) **সমমেল বিকৃতি** (harmonic distortion)ঃ মাইক্রোফোন-ছদে জোরালো শব্দ পড়লে তার সরণ আর প্রযুক্ত বলের সমানুপাতী থাকে না (যুগ্মস্বনের উৎপত্তির কথা ভাবো)। তখন মাইক্রোফোনের উৎপাদে (output) আপতিত কম্পাংকের উচ্চতর সমমেল আসে—এই ঘটনাকেই সমমেল-বিকৃতি বলে। তাই জোরালো শাব্দচাপের এক ঊর্ধ্বসীমার ওপরে আর তার বৈদ্যুতিক রূপান্তরণ করা হয় না; করলে, এই বিকৃতি অস্বাভাবিক রকম বেড়ে ওঠে।

(৩) **দিঙ্মুখিতা** (directivity)ঃ অনেক ট্রানজিস্টর রেডিওতে শব্দের জোর, দিক্‌-বদলানোর সঙ্গে বদলায়—দেখে থাকবে। দিঙ্মুখিতার জন্যেই এরকম হয়। দেখা গেছে, কোন এক অক্ষ বরাবর মাইক্রোফোনের সঙ্গে স্বনকের সংযোজক রেখা থাকলে, মাইক্রোফোনে সর্বাধিক সাড়া জাগে; দুটি রেখার মধ্যে কোণ যত বাড়ে সাড়া ততই কমে; এই কোণভেদে সাড়ার পরিবর্তনই মাইক্রোফোনের দিঙ্মুখিতা-দোষ।

মাইক্রোফোনের এই তিন দোষ কম থাকাটাই বাঞ্ছনীয়।

গ. শ্রেণীবিভাগঃ বহুমুখী উদ্দেশ্যে মাইক্রোফোনের ব্যবহার হয়; ব্যবহার বা উদ্দেশ্যভেদে মাইক্রোফোনের ভিন্ন ভিন্ন বৈশিষ্ট্যের সমন্বয় ও সামঞ্জস্যবিধান দরকার। অতএব প্রয়োগবৈচিত্র্যের ভিত্তিতে ভিন্ন ভিন্ন মাইক্রোফোনের উদ্ভাবন হয়েছে; যেমন—তপ্ত-তার, কার্বন, ধারক বা স্থিরতাড়িৎ, স্ফটিক বা চাপবৈদ্যুত, দোল-কুণ্ডলী বা চলতাড়িৎ, রিবন বা বেগক্রিয় প্রভৃতি। কাজেই এদের সঠিক শ্রেণীভেদ দুরূহ। উদাহরণস্বরূপ বলা চলে যে, তালিকার প্রথম দুটিকে খাঁটি মাইক্রোফোন বলায় সঙ্গত আপত্তি আছে; কেননা তপ্ত-তার মাইক্রোফোনে কম্পনক্ষম ছদও নেই, তাতে বিভবভেদও উৎপন্ন হয় না, আর

কার্বন মাইক্রোফোনেও বিভবভেদ উৎপন্ন হয় না—দিষ্ট বিদ্যুৎ-ধারায় ভেদন আসে।

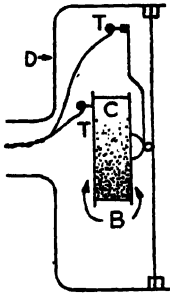
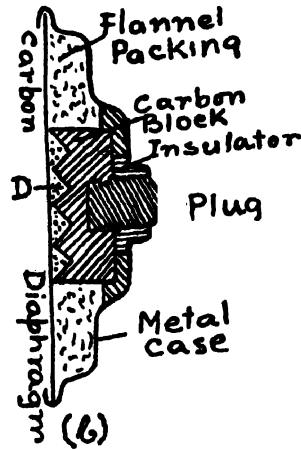
সংজ্ঞাসম্মত মাইক্রোফোনগুলিকে সাধারণভাবে **চাপক্রিয়** এবং **বেগক্রিয়** এই দুই শ্রেণীতে ফেলা যায় ; প্রথম শ্রেণীর যন্ত্রগুলিতে ছদের ওপর আপতিত শাব্দচাপ, দ্বিতীয় শ্রেণীতে শব্দবাহী মাধ্যমের কণাবেগ—সংশ্লিষ্ট-বর্তনীতে বৈদ্যুতিক সাড়া জাগায়। তা ছাড়া, শব্দতরঙ্গ প্রথম শ্রেণীর ছদের একপাশে, দ্বিতীয় শ্রেণীতে দু'পাশেই পড়ে। ওপরে যে ক'টির নাম বলা হয়েছে তাদের মধ্যে শেষেরটি বেগক্রিয় শ্রেণীর, অপরগুলি চাপক্রিয় ; বলা বাহুল্য, চাপক্রিয় শ্রেণীর মাইক্রোফোনের চলই বেশী। তবে মনে রাখা দরকার যে, এই শ্রেণীবিভাগ খুব পরিষ্কারভাবে প্রযোজ্য নয়। কেননা, যৎসামান্য হলেও চাপভেদের অভাবে কণাসরণ বা বেগ সম্ভব নয়, অতএব বিনা চাপভেদে বেগক্রিয় যন্ত্র অচল ; আবার আপতিত চাপে ছদের সরণ তথা বেগ থাকবেই, অর্থাৎ চাপক্রিয় যন্ত্রে ছদ নিশ্চল নয়। যেমন, বৈদ্যুতিক ধারামাপী যন্ত্র অ্যামিটারের দুই প্রান্তে সামান্য হলেও বিভবভেদ থাকতেই হবে, আবার বৈদ্যুতিক বিভবভেদমাপী যন্ত্র ভোল্টমিটারের মধ্যে দিয়ে সামান্য হলেও বিদ্যুৎ-ধারা পাঠাতে হবেই। সুতরাং বিশুদ্ধ চাপক্রিয় বা বিশুদ্ধ বেগক্রিয় মাইক্রোফোন অবাস্তব কল্পনা মাত্র। তা ছাড়া আবার, মাধ্যমভেদে যন্ত্রের শ্রেণীরূপ উল্টে যেতে পারে ; যেমন, জলের শাব্দবাধ বায়ুর তুলনায় 3500 গুণ হওয়ায় যে মাইক্রোফোন বায়ুতে চাপক্রিয়, জলে সে বেগক্রিয়। জলে ছদের স্পন্দনে বাধা কম্পাংক-নির্ভর, তাই আবার বেগক্রিয় ছদ নিম্নকম্পাংকে চাপক্রিয় হয়ে যায়, বায়ুতে এই পরিবর্তন ঘটে না, কেননা তাতে শাব্দবাধ জলের তুলনায় অনেক কম।

আবার এদের, **শব্দচালিত** এবং **শব্দনিয়ন্ত্রিত** এই দুই শ্রেণীতেও ভাগ করা যায় ; যদি মাইক্রোফোনে উৎপন্ন বিদ্যুৎশক্তি তরঙ্গের শব্দশক্তি থেকেই আহরিত হয় (ধারক মাইক্রোফোন—§ ১৫-১২) তখন সে শব্দচালিত, আর যদি শব্দশক্তি মাইক্রোফোনে নিরপেক্ষ উৎস থেকে পাঠানো বিদ্যুৎ-ধারার পরিবর্তন ঘটায় (কার্বন মাইক্রোফোন § ১৫-১১) তখন সে শব্দনিয়ন্ত্রিত। চাপক্রিয় বা বেগক্রিয় যন্ত্র শব্দচালিতও হতে পারে, শব্দনিয়ন্ত্রিতও হতে পারে। মোটামুটিভাবে এদের শব্দচালিতই বলা যায়।

এ-ছাড়াও মাইক্রোফোন যন্ত্রগুলির অনুনাদী ও পরবশ, বায়ব এবং সামুদ্র, দিঙ্মুখী ও দিক্-নিরপেক্ষ প্রভৃতি নানারকম শ্রেণীবিন্যাস ঘটানো যায় ; কিন্তু কোন শ্রেণীভেদই নিঃসংশয় নয়।

১৫·১১. কার্বন মাইক্রোফোন :

ক. নীতি : শ্লথভাবে সন্নিবিষ্ট কার্বন দানা-সমষ্টির ওপর চাপ পড়লে তাদের সংযোগ-বিন্দুগুলির ঘনিষ্ঠতা বাড়ে এবং মোট বৈদ্যুতিক রোধ কমে যায়। শব্দতরঙ্গ এইরকম দানা-সমষ্টির ওপর পড়তে থাকলে চাপভেদের ক্রিয়ায় তাদের সংযোগগুলিতে ঘনিষ্ঠতা পর্যায়ক্রমে কমে বাড়ে, ফলে রোধও পর্যায়ক্রমে বাড়ে কমে। কার্বন দানা-সমষ্টির মধ্যে দিয়ে যদি দিষ্ট বিদ্যুৎ-ধারা পাঠানো যায়, তাহলে রোধের বাড়া-কমার ফলে সেই বিদ্যুৎ-ধারা তদনুযায়ী কমতে বাড়তে থাকে, অর্থাৎ তার ভেদন (modulation) হয়। এই ঘটনাই সবরকম কার্বন মাইক্রোফোনের কার্যকরী নীতি। এরা শব্দনিয়ন্ত্রিত এবং দূরভাষণে সর্বাধিক ব্যবহৃত প্রেরকযন্ত্র; কেননা সংযোগ-ব্যবস্থায় বিস্তীর্ণ পাল্লায় সমান সাড়া পাওয়ার চেয়ে সংবেদিতাই বেশী কাম্য।

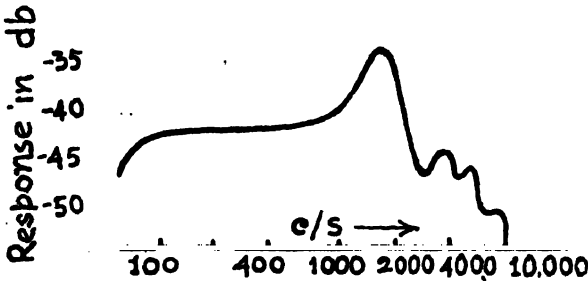
খ. যন্ত্র : এডিসন ও হিউজেস উদ্ভাবিত টেলিফোন প্রেরক যন্ত্রই

চিত্র 15.14(*a*) কার্বন মাইক্রোফোন চিত্র 15.14(*b*)

(15.14*a*) কার্বন মাইক্রোফোনের সেরা উদাহরণ। সযত্নে নির্বাচিত অ্যান্থ্রাসাইট কয়লার (*C*) গুঁড়ো-ভর্তি একটি কার্বনের পাতে তৈরী বাক্স, এর সর্বপ্রধান অংশ। বাক্সের সামনের এবং পেছনের পাতগুলি (*B*) খুবই পাতলা এবং মসৃণ। দুই প্রান্তিক *T*, *T* মারফৎ ব্যাটারী থেকে দিষ্ট বিদ্যুৎ-ধারা কার্বন গুঁড়ার মধ্যে দিয়ে পাঠানো হয়। *D** স্পন্দনক্ষম ছদ—

* যন্ত্রের ডাইনে, ছবিতে ভুল জায়গায় নির্দেশ আছে।

একটি গুটি বা বোতাম তার সঙ্গে বাক্সের সামনের পাতের সঙ্গে যোগ রাখে। তীক্ষ্ণ অনুনাদ এড়াবার জন্য ছদের পারিধি বরাবর নরম জিনিসের প্যাকিং দেওয়া হয়। 15.19a চিত্রে জলের গভীরে ব্যবহারের জন্যে একটি ছোটখাটো অথচ মজবুত কার্বন মাইক্রোফোন দেখানো হয়েছে।

15.14(b) চিত্রে একটি আধুনিক দূরভাষ-প্রেরকে ব্যবহৃত কার্বন মাইক্রোফোন দেখানো হয়েছে। তাতে প্রায় 2″ ব্যাসের ধাতু বা কার্বনের পাত ছদের কাজ করে। তার স্পন্দনেই কার্বন দানাগুলির ওপর চাপ বাড়ে কমে। কার্বন-গুঁড়ো, কার্বন ব্লক এবং মোটা ছিপির মধ্যে দিয়ে বিদ্যুৎ-ধারা যায়। এখানে ফ্ল্যানেল প্যাকিং দিয়ে অনুনাদের সম্ভাবনা কমানো হয়।

15.14(c) চিত্রে এর কম্পাংক-সাড়া-লেখ দেখানো হয়েছে। লক্ষণীয় যে, সাড়া বা প্রতিবেদন বিশ্বস্ত নয়, কেননা লেখ কম্পাংক-অক্ষের সমান্তরাল নয়। অবশ্য বিশ্বস্ততার বিশেষ দরকারও নেই, কেননা টেলিফোনে 100 থেকে

চিত্র 15.14(c)—কার্বন মাইক্রোফোনে সাড়া-কম্পাংক-লেখ

5000/সে কম্পাংকের বাইরে বড় একটা স্পন্দন হয় না। সাধারণ কণ্ঠস্বরের কম্পাংকপাল্লার মাঝামাঝি কম্পাংক হচ্ছে 2000/সে ; তাই সেই কম্পাংকে ছদের অনুনাদ ঘটিয়ে এক তুঙ্গ-সাড়ার (peak response) ব্যবস্থা করা হয়। এই যন্ত্রে সুবেদিতা বাড়ানোর খাতিরেই বিশ্বস্ততা বর্জন করা হয়। **সব মাইক্রোফোনের মধ্যে কার্বন মাইক্রোফোনই সবচেয়ে সুবেদী।**

গ. কৃতিত্ব-বিচার : মাইক্রোফোনের TT প্রান্তিক-দুটির মধ্যে শ্রেণী সমবায়ে একটি ব্যাটারী, চাবি এবং একটি আরোহ (step-up) ট্র্যান্সফর্মারের মুখ্য কুণ্ডলী যুক্ত থাকে ; তার গৌণ কুণ্ডলী দূরভাষ গ্রাহকের সঙ্গে যুক্ত।

চাবি বন্ধ করলে মাইক্রোফোনের মধ্যে দিয়ে দুর্বল দিষ্ট ধারা ($i_0 = E/R$) চলে; এবারে ছদে শব্দতরঙ্গ পড়তে থাকলে স্পন্দনের ($a \sin \omega t$) সমানুপাতিক প্রত্যাবর্তী-রোধ ($Ka \sin \omega t$) বর্তনী-রোধের সঙ্গে যুক্ত হয়। তখন যেকোন নিমেষে বিদ্যুৎ-ধারার মান দাঁড়ায়

$$i = \frac{E}{R + Ka \sin \omega t} = \frac{E}{R}\left[1 + \frac{Ka}{R} \sin \omega t\right]^{-1}$$

$$= \frac{E}{R}\left(1 - \frac{Ka}{R} \sin \omega t + \frac{K^2 a^2}{2R^2} \sin 2\omega t - \cdots\right] \quad (১৫\text{-}১১.১)$$

এখানে দেখা যাচ্ছে যে, প্রথম রাশিটি দিষ্ট ধারা (i_0), দ্বিতীয়টি আপতিত শব্দতরঙ্গের সমকম্পাংক প্রত্যাবর্তী ধারা এবং পরবর্তীগুলি উচ্চতর সমমেলের ধারা নির্দেশ করছে। এইভাবে ভেদিত (modulated) ধারা মুখ্য কুণ্ডলীর মধ্যে চলে এবং গৌণ কুণ্ডলীতে বিবর্ধিত হয়ে উত্তরিত (transmitted) হয়—আমরা তারই অনুসারী শব্দ টেলিফোন গ্রাহকে শুনি।

১৫-১১.১ সমীকরণের দ্বিতীয় রাশিটি প্রত্যাবর্তী মূল বা প্রথম সমমেল বিদ্যুৎ-ধারা, উচ্চতর সমমেলগুলি নগণ্যমান। এই ধারাটির দরুন উৎপন্ন বিভবভেদের মান চরম ($-EKa/R$) হবে; এখন আপতিত শাব্দচাপ যদি $p_m \sin \omega t$ ধরি, তাহলে কার্বন মাইক্রোফোনের সুবেদিতার মান হবে

$$M_{\mathrm{R}} = \frac{\text{উৎপন্ন বিভবভেদবিস্তার}}{\text{উৎপাদক শাব্দচাপবিস্তার}} = \frac{EKa/R}{p_m} \quad (১৫\text{-}১১.২)$$

এখন আপতিত শাব্দচাপের ($p_m \sin \omega t$) ক্রিয়ায় যদি মাইক্রোফোন ছদের সরণ x হয়, তাহলে $sx = Ap_m \sin \omega t$; এখানে ছদের যতখানি জায়গা জুড়ে শব্দতরঙ্গ পড়ছে তার ক্ষেত্রফল A, আর s ছদের দার্ঢ্য গুণাংক। সুতরাং

$$x = (Ap_m/s) \sin \omega t = a \sin \omega t$$

$$\therefore \quad M_{\mathrm{R}} = \frac{EKa}{p_m} = \frac{EKAp_m}{Rp_m s} = \frac{EKA}{sR} \quad (১৫\text{-}১১.৩)$$

ঘ. **গুণাগুণ:** এই যন্ত্রের গঠন খুবই সরল এবং কাজে বিশেষ-রকম মজবুত। কোনরকম সম্প্রসারণ না ঘটিয়েই এর উৎপাদে জোরালো বিদ্যুৎ-ধারা মেলে। আগেই বলা হয়েছে এটি সর্বাধিক সুবেদী মাইক্রোফোন,

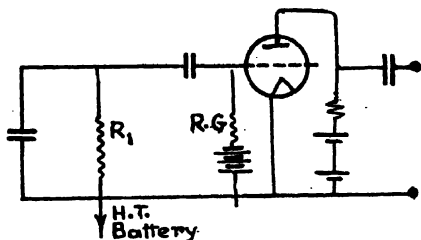
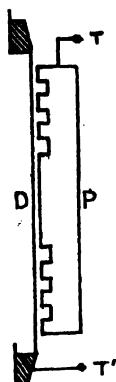
এর শব্দবৈশিষ্ট্য-হস্তান্তরে বিশ্বস্ততা কম—অবশ্য যে উদ্দেশ্যে এর ব্যবহার তাতে এই গুণ অদরকারী। এর উৎপাদে উচ্চতর সমমেল আসাতেই বিকৃতি আসে; কার্বন দানাসমূহের রোধের হ্রাস সরণের ব্যস্তানুপাতিক হওয়াতেই সমমেলের উৎপত্তি হয়। এর দ্বিতীয় ত্রুটি, যথেষ্ট স্বকীয় অপস্বর; প্রবাহ চলাকালে দানাগুলির সংযোগবিন্দুতে জুল তাপন হয়—তাই টেলিফোনে হিস্‌হিস্ শব্দ শোনা যায়। প্রবাহমাত্রা বাড়লে হিস্‌কারও বাড়ে, তাই মাইক্রোফোনে পাঠানো প্রবাহমাত্রা এক ঊর্ধ্বসীমায় সীমিত থাকে। ১৫-১১.৩ সমীকরণে তাই E বাড়িয়ে M_R বাড়ানো হয় না; আবার K বাড়িয়ে R কমিয়ে M_R বাড়ানো সম্ভব হলেও, তা করা হয় না, কারণ (a/R) অনুপাত বেড়ে গিয়ে দ্বিতীয় সমমেলকে জোরালো ক'রে বিকৃতি বাড়াবে। সবচেয়ে বড় অসুবিধা এই যে, কার্বন দানাগুলির জমাট-বাঁধার প্রবণতা থাকায়, রোধ কমে গিয়ে যন্ত্রটি বিশেষ-রকম অগ্রাহী (insensitive) হয়ে পড়ে।

উৎপাদে অরৈখিক বিকৃতি এড়াতে **দ্বি-গুটি** (double-button) মাইক্রোফোন ব্যবহার করা হয়। এতে গুণগত উৎকর্ষ এবং উৎপন্ন ক্ষমতা দুইই বাড়ে। এখানে ছদের দু'ধারে দুটি বাক্স থাকে, ফলে ছদের স্পন্দন যেদিকে হয় সেদিকে রোধ কমে, আর অন্যদিকে বাড়ে। তারা ইলেকট্রনীয় আকর্ষ-বিকর্ষ (push-pull) বর্তনীর মতো আচরণ করে। ফলে, উৎপন্ন সমমেলগুলি (এরাই বিকৃতি ঘটায়) পরস্পরকে প্রশমিত করে। তবে অপস্বর ও দানা-জমাট-বাঁধা দোষ এখানেও বেশী। সুবেদিতা বাড়াতে ছদকে অগভীর শংকুর আকার দিয়ে কেন্দ্রে দানাবেষ্টিত গ্রাফাইট পাত বসানো হয়।

১৫-১২. স্থিরবিদ্যুৎ বা ধারক মাইক্রোফোন :

ক. কার্যকরী নীতি : আহিত সমান্তরাল-পাত স্থিরবিদ্যুৎ-ধারকের ধারকত্বের মান $(C = kA/4\pi t)$ দুই পাতের মধ্যবর্তী দূরত্বের (t) ওপর নির্ভর করে। এখন যদি একটি ধাতব ছদের ওপর শব্দতরঙ্গ প'ড়ে তার স্পন্দন ঘটায় এবং ছদটি একটি সমান্তরাল-পাত ধারকের অন্যতম পাত হয়, তাহলে তার ধারকত্ব পর্যায়ক্রমে ওঠা-নামা করবে। সুতরাং যে বহির্বর্তনী থেকে ধারক আহিত হয়েছে তার বিভবভেদে $(V = Q/C)$ প্রত্যাবর্তী পরিবর্তন ঘটে।

খ. যন্ত্র-বর্ণনা : 15.15(a) ছবিতে দেখানো এই যন্ত্রের প্রধান অংশ, মাত্র 0.002″ বেধের একটি লোহার পর্দা (D); এটিই শব্দগ্রাহক এবং একটি ভারী লোহার পর্দায় স-টানভাবে আটকানো; এর ওপর যা টান থাকে,

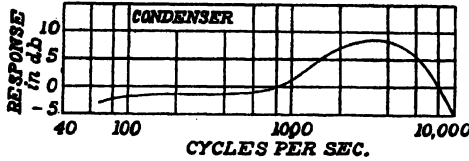
তাতে এর স্বাভাবিক কম্পাংক 7000/সে-এর বেশী হয়। ফলে, স্বাভাবিক শব্দে এর অনুনাদ হতে পারে না। এই টান পর্দাকে তার উপাদানের স্থিতিস্থাপক সীমার কাছাকাছি নিয়ে যায়। D থেকে 0.001″ তফাতে অপর লোহার পাত

চিত্র 15.15(*b*)
ধারক মাইক্রোফোনের সংশ্লিষ্ট বর্তনী

চিত্র 15.15(*a*)—ধারক মাইক্রোফোন

P ; ভেতরের বায়ু একেবারে শুকনো রাখতে, পাত-দুটিকে বায়ুনিরুদ্ধ (seal) ক'রে দেওয়া হয়। এই পাতটির ব্যাস বরাবর বা সমকেন্দ্রিক বৃত্ত বরাবর অগভীর নালি কাটা থাকে ; এতে স্পন্দন-দমনে সাহায্য হয় এবং দমনাংকের মান 14,000-এর মতো হয়।

15.15(b) ছবিতে এর সংশ্লিষ্ট বৈদ্যুতিক বর্তনী দেখানো হয়েছে। একেবারে বাঁয়ে ধারক মাইক্রোফোনটি রয়েছে ; তাকে কয়েক মেগ্‌ওহ্‌ম রোধের (R_1) মারফতে উচ্চ বিভবভেদের (H.T) ব্যাটারীর (200—400V) সঙ্গে যোগ করা থাকে। মাইক্রোফোনের ছদের স্পন্দনে উৎপন্ন ধারকত্বভেদ, R_1 রোধে যে বিভবভেদ উৎপন্ন করে, তার প্রত্যাবর্তী অংশ দ্বিতীয় ধারকের সহায়তায় একটি ইলেকট্রনিক ভাল্‌ভের গ্রিডে পাঠানো হয় ; গ্রিড-রোধের (RG) ক্রিয়ায় এই বিভবভেদ ভাল্‌ভে বিবর্ধিত হয়। তার আবার প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা অংশটি তৃতীয় ধারকের সাহায্যে ছেঁকে বার ক'রে নেওয়া যায়। এই মাইক্রোফোনের সুবেদিতা কম ; কিন্তু বিবর্ধক বর্তনীর প্রসাদে বিদ্যুৎ-ধারা ইচ্ছামতো সম্প্রসারিত হওয়ায় এই ত্রুটি অনুল্লেখ্য।

গ. গুণাগুণ : 15.15(c) চিত্রে যন্ত্রটির কম্পাংক-সাড়া-লেখ দেখানো হয়েছে। মোটামুটিভাবে 100 থেকে প্রায় 1000/সে কম্পাংক পর্যন্ত সাড়ার

মান সমানই থাকে, অর্থাৎ এর বিশ্বস্ততা যথেষ্টই। দরকারমতো সাড়ার মান বদ্‌লিয়ে লেখটিকে স্থানান্তরে আনা সম্ভব। যন্ত্রটিকে ছোট্ট আকারে তৈরী করা যায়, কোন ভঙ্গুর অংশ নেই এবং তাকে শব্দের গ্রাহক ও প্রেরক দু'ভাবেই ব্যবহার করা যায়।

চিত্র 15.15(c)—ধারক মাইক্রোফোনে কম্পাংক-সাড়া-লেখ

এর প্রধান অসুবিধা যে সুবেদিতার অভাব, তা ইলেকট্রনিক ভাল্‌ভ বর্তনীর কল্যাণে দূরীভূত। কিন্তু আরও দুটি অসুবিধা আছে—যন্ত্রটি দিঙ্মুখী এবং 10 কিলোচক্রের ঊর্ধ্বে সাড়া দেয় না।

এর কৃতি বাড়াতে স্পন্দনশীল ছদটির সামনে সচ্ছিদ্র আর-একটি পাত রাখা হয়; ফুটোর মধ্যে দিয়ে শব্দতরঙ্গ ঢোকে, ফলে ছদের দু'ধারে বায়ুস্তরের উপস্থিতি তার দমন বাড়ায়। এইভাবে সাড়ার সমতা 8000 চক্র পর্যন্ত বাড়ানো যায়। তাই মিশ্র স্বরের তীব্রতা-মাপনে বা বিশ্লেষণে এবং কণ্ঠস্বর বা বাজনার সুরকে অবিকৃতভাবে বৈদ্যুতিক স্পন্দনে রূপান্তরিত করতে আজকাল এই যন্ত্রটির খুব ব্যবহার হচ্ছে।

আর-এক শ্রেণীর যন্ত্রে দুই ধারক-পাতের মধ্যে দিয়ে শব্দতরঙ্গ পাঠানো হয়; উৎপন্ন সংকোচন-প্রসারণ ধারকের ভেতরে বায়ুর ঘনত্ব বদ্‌লাতে থাকে। তাতে বায়ুর দ্বি-বৈদ্যুত ধ্রুবকের (dielectric constant, k) মান পরিবর্তিত হয়ে ধারকত্বের মানও বদ্‌লাতে থাকে এবং প্রয়োজনীয় প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ ঘটায়।

ঘ. তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ: ধরা যাক, ধারক মাইক্রোফোনের স্বাভাবিক ধারকত্ব C_0; আপতিত শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ার ধারকত্বে পরিবর্তনের নিমেষ-মান $C' \sin \omega t$ (এখানে, $C' \leqslant C_0$) ধরা হোক; তাহলে যেকোন মুহূর্তে শব্দগ্রাহী মাইক্রোফোনের ধারকত্ব হবে

$$C = C_0 + C' \sin \omega t$$

মাইক্রোফোনের ধারকত্বের পরিবর্তনের ফলে R_1 রোধের প্রান্তীয় বিভবভেদ বদ্‌লাতে থাকে—সেই বিভবভেদ বিবর্ধিত হয়ে শেষ পর্যন্ত লাউড-স্পীকারে

যাবে। ব্যাটারীর বিভবভেদ E ধরলে, বর্তনীতে বিদ্যুৎ-ধারার নিমেষমান হবে

$$E-Ri=\frac{Q}{C}=\frac{1}{C}\int i.dt \qquad (১৫\text{-}১২.১)$$

$$\therefore \qquad RiC+\int i.dt-EC=0$$

অবকলন ক'রে পাব

$$R\ (di.C+dC.i)+i.dt-E.dC=0$$

বা $$R(di/dt)(C_0+C'\sin\omega t)+Ri.\omega C'\cos\omega t$$
$$+i-EC'\omega\cos\omega t=0$$

বা $$R\left(\frac{di}{dt}\right)(C_0+C'\sin\omega t)+i(R\omega C'\cos\omega t+1)$$
$$-EC'\omega\cos\omega t=0 \qquad (১৫\text{-}১২.২)$$

গোড়াতেই বলা হয়েছে যে $C_0 \geqslant C'$ এবং R_1-এর মান কয়েক মেগ্-ওহ্‌ম অর্থাৎ $R_1 \geqslant 1/\omega C_0$ হবে; এই সর্তাধীনে এই অবকল সমীকরণের সমাধান ক'রে i-এর মান পাব; তাকে R_1 দিয়ে গুণ করলে

$$e=\frac{EC'R_1\sin(\omega t+\phi)}{C_0[R_1^2+(1/\omega C_0)^2]^{\frac{1}{2}}} \qquad (১৫\text{-}১২.৩)$$

এখানে e হচ্ছে R_1 রোধের নিমেষ-প্রান্তীয়-বিভবভেদ। সুতরাং বলা যায় যে ধারক মাইক্রোফোন, এমন এক বৈদ্যুতিক উৎস, যার বিদ্যুৎ-চালক বল $E(C'/C_0).\sin(\omega t+\phi)$ এবং অভ্যন্তরীণ রোধ $(1/\omega C_0)$-এর সমান।

$p=p_m\sin\omega t$ পরিমাণ শাব্দচাপের ক্রিয়ায় মাইক্রোফোনের ছদের সরণবিস্তার $x_m \simeq p_m A/8\pi T$ পরিমাণ হবে; A এখানে ছদের শব্দগ্রাহী ক্ষেত্রফল এবং T, ছদের পরিধির একক দৈর্ঘ্য বরাবর প্রযুক্ত টান। এই সরণই $(x_m \leqslant t)$ ধারকত্বে C' পরিমাণ পরিবর্তন আনে।

$$\therefore \quad C'=C-C_0=C_0(1+x_m/t)-C_0$$
$$=C_0\frac{x_m}{t}=\frac{C_0p_mA}{8\pi Tt} \qquad (১৫\text{-}১২.৪)$$

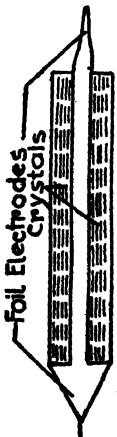
তাহলে এই মাইক্রোফোনের সুবেদিতার মান হবে

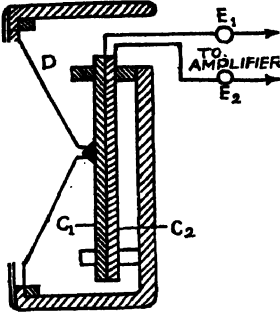
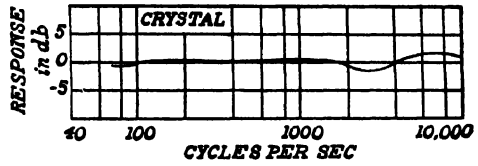
$$M_R=e_m/p_m=EC'/p_mC_0=EA/8\pi Tt \qquad (১৫\text{-}১২.৫)$$

মাইক্রোফোনের নিজস্ব ধারকত্ব মাত্র $50 \mu\mu f$ পরিমাণের হওয়ায়, তার সঙ্গে সংযোগকারী তারগুলি লম্বা নেওয়া যায় না—নিলে সুবেদিতা কমে যায়। যন্ত্রটির অভ্যন্তরীণ বাধ উচ্চমান হওয়ায় তা কমানোর জন্য 15.14(*b*)-তে দেখানো প্রাক্-বিবর্ধন (preamplifier) ব্যবস্থা মাইক্রোফোনের কাছাকাছিই রাখতে হয়—এটা একটা অসুবিধাই বটে। আর্দ্রতা থাকলে ধারকের তল থেকে আধান-ক্ষরণ হবার সম্ভাবনা থাকে—তাই আর্দ্রতারোধী আস্তরণ দিতে হয়।

১৫-১৩. চাপবৈদ্যুত বা স্ফটিক মাইক্রোফোন:

ক. নীতি: ২০ অধ্যায়ে আমরা চাপবৈদ্যুত ঘটনা আলোচনা ক'রবো। কোয়াৎ´জ্, রোচেল সল্ট, *ADP*, লিথিয়াম সালফেট প্রভৃতি স্ফটিকের বা বেরিয়াম টাইটানেট জাতীয় প্লাস্টিকের **যথোপযুক্তভাবে কাটা** আয়তখণ্ডের দুই বিপরীত তলে চাপ দিলে দুই তলের মধ্যে সামান্য বৈদ্যুতিক বিভবভেদ দেখা দেয়; আবার তাদের টান দিয়ে বেধ বাড়াতে চেষ্টা করলে বিপরীতধর্মী আধান প্রকটিত হয়। **উৎপন্ন বিভবভেদ প্রযুক্ত বলের সমানুপাতিক।** শব্দতরঙ্গ এইরকম যথাযথভাবে কাটা স্ফটিকের ওপর পড়লে শাব্দচাপের বাড়া-কমার ফলে, তার দুই তলের মধ্যে প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ উৎপন্ন হয়; তাকে ইলেকট্রনিক বিবর্ধকের সাহায্যে বাড়িয়ে নিয়ে লাউড-স্পীকারে পাঠানো হয়।

খ. যন্ত্র-বর্ণনা: রোচেল সল্টের চাপবৈদ্যুত গুণাংক বেশী ব'লে তার X- বা Y-ছেদ স্ফটিকের অক্ষের 45° কোণে কাটা একটি পাত নেওয়া হয়। একে **প্রসারক পাত** বলে; তার দৈর্ঘ্য বরাবর অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন হলে, তার চওড়া দুই তলে বিপরীত ধর্মের আধান প্রকাশ পায়। এর যান্ত্রিক বাধ বায়ুমাধ্যমের বিশিষ্ট বাধের তুলনায় অনেক বেশী। তাই দুটি এইরকম পাত সমান্তরালে জুড়ে যান্ত্রিক বাধ কমানো হয়; এই সমন্বয়কে bimorph বলে। রোচেল সল্ট জলে দ্রবণীয় ব'লে জলীয় বাষ্পের প্রভাব এড়াতে পাত-দুটিতে মোমের প্রলেপ দেওয়া থাকে। তার ওপর প্রতিটি পাতের দুই তলেই নরম, পাতলা ধাতুপাত দিয়ে মুড়ে পাত-দুটির মধ্যে সামান্য তফাৎ রেখে ধাতুপাতগুলি জুড়ে দেওয়া হয়। 15.16(*a*) চিত্রে এইরকম একটি bimorph দেখানো হয়েছে। 45°C উষ্ণতার ওপরে এদের ব্যবহার করা হয় না।

চিত্র 15.16(*a*)
Bimorph

15.16(b) চিত্রে এই মাইক্রোফোনের কার্যকরী সমাবেশ দেখানো হয়েছে। C_1C_2 দুটি প্রসারক পাতের সমাবেশ—তার মধ্যবিন্দুতে শব্দ-সংগ্রাহী শংকুর (D) স্পন্দনশীল ছদটি যুক্ত। আপতিত সংকোচন-তরঙ্গের ক্রিয়াতে বাইমর্ফ ভেতরের দিকে বাঁকে, প্রসারণ-তরঙ্গের ক্রিয়াতে সেটি বাঁকে বাইরের দিকে। এইজাতীয় বাইমর্ফ বকংনশ্রেণীভুক্ত। প্রকৃত ক্ষেত্রে এই ধরনের মাইক্রোফোনে (বিকিরণগ্রাহী থার্মোপাইলের মতো) অনেকগুলি যুক্তপাত থাকে। তাদের এমনভাবে সাজানো থাকে যে

চিত্র 15.16(b)—যন্ত্রসজ্জা : স্ফটিক-মাইক্রোফোন   চিত্র 15.16(c)—তার সাড়া-কম্পাংক-লেখ

সব-ক'টির বিভববৈষম্যের সমষ্টি E_1 E_2 দুই বিদ্যুৎ-প্রান্তিকের সাহায্যে বিবর্ধকে পাঠানো হয়; এই বিভবভেদ অবশ্যই প্রত্যাবর্তী। স্পন্দকছদ বাদ দিয়ে শব্দতরঙ্গ **সরাসরি** যুগ্মপাতের ওপরেও পড়তে দেওয়া যায়। শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় স্ফটিকে যুগ্মপাতের বংকন, উষ্ণতাবৃদ্ধিতে দ্বিধাতুক (bimetallic strip) পাতের বংকনের সমজাতীয় ঘটনা।

15.16(c) ছবিতে এর কম্পাংক-সাড়া-লেখ দেখানো হয়েছে। দেখা যাচ্ছে সাড়া বেশ বিশ্বস্ত, কেননা 20 থেকে 2000 চক্রের মধ্যে সে প্রায় অপরিবর্তিত থাকে। 10 কিলোচক্রেও সাড়া বিশেষ বদ্‌লায় না।

গ. তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ : ধরা যাক যে, স্ফটিক পাতের দৈর্ঘ্যের দিক্‌টি x-অক্ষ বরাবর আছে এবং সেই অক্ষ বরাবর অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন ঘট্‌ল এবং তাতে স্ফটিকের আয়তাকার x-y তল-দুটিতে σ তল-ঘনত্ব নিয়ে বিপরীত আধানের আবির্ভাব হ'ল। তা হলে $\sigma = k(d\xi/dx)$, k এখানে চাপ-বৈদ্যুত যোজনাংক, $d\xi/dx$ অনুদৈর্ঘ্য-বিকৃতি। দুই তলে বিপরীতধর্মী আধান থাকায় তাদের মধ্যে বিভবভেদ

$$e = \frac{\int \sigma . dA}{C_0} = \frac{kA}{C_0} \cdot \frac{d\xi}{dx} \qquad (১৫\text{-}১৩.১)$$

এখানে e মুক্তবর্তনীতে বিভবভেদ অর্থাৎ উৎপন্ন বিদ্যুৎ-চালক বল, A স্ফটিক-তলের ক্ষেত্রফল এবং C_0 স্ফটিক-ধারকের ধারকত্ব।

আপতিত শব্দতরঙ্গ স্বল্পকম্পাংকের হলে সংশ্লিষ্ট তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় স্ফটিকপাতের দৈর্ঘ্য নগণ্য ধরা যায় এবং তখন $p = p_m \sin \omega t$ শাব্দচাপের ক্রিয়ায় উৎপন্ন অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন x-নিরপেক্ষ [শাব্দচাপ স্ফটিকের y-z তলে সক্রিয়] হয়। তখন বিকৃতি

$$\frac{d\xi}{dx} = -\frac{p}{q} = -\frac{p_m \sin \omega t}{q} \qquad (১৫\text{-}১৩.২)$$

এখানে q স্ফটিক-উপাদানের ইয়ং-গুণাংক। এই মান ১৫-১৩.১-এ বসালে

$$e = \frac{kAp_m}{qC_0} \sin \omega t \text{ এবং } E = \frac{kAp_m}{qC_0} \qquad (১৫\text{-}১৩.৩)$$

পাব। তাহলে সুবেদিতা $M_R = E/p_m = kA/qC_0$ (১৫-১৩-৪)

ঘ. **গুণাগুণ :** এই মাইক্রোফোনটি খুবই সাদাসিধে যন্ত্র, সুতরাং দামে সস্তা, আকারেও ছোট। এদের দিঙ্মুখিতা-ত্রুটি নেই, নেই স্বকীয় অপস্বরও। তা ছাড়া দেখাই গেছে 2000 চক্র পর্যন্ত সাড়া খুবই বিশ্বস্ত ; 8000 চক্র পর্যন্ত সাড়ায় গড় বিচ্যুতি 6 ডেসিবেলের বেশী হয় না।

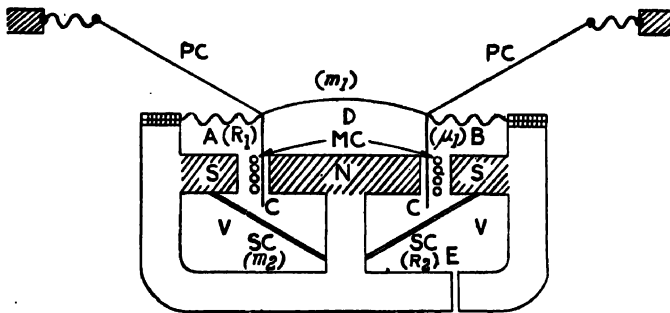
তবে এদের ক্ষেত্রে উৎপন্ন ক্ষমতা ধারক-মাইক্রোফোনের মতোই অল্প, সুতরাং তার বিবর্ধন দরকার। আর্দ্রতা দুই-জাতীয় মাইক্রোফোনেরই ক্ষতি কমায়। উষ্ণতাও এদের ক্ষতির পরিপন্থী। প্রসঙ্গত, দুই-জাতীয় মাইক্রোফোনই চাপক্রিয় হওয়ায় শব্দের প্রেরক ও গ্রাহক দু'ভাবেই কাজ করতে পারে। সূক্ষ্ম বা উচ্চমানের প্রয়োজনে স্ফটিক-মাইক্রোফোন অচল।

সাধারণ বক্তৃতামঞ্চ থেকে জনসম্ভাষণের কাজে, শ্রবণ-বান্ধব যন্ত্রে (hearing aids) এবং শূন্য শাব্দতীব্রতা স্তর (§ ১৭-৭) সাপেক্ষে 20 থেকে 60 ডেসিবেল পর্যন্ত শাব্দচাপমাপী যন্ত্রে স্ফটিক-মাইক্রোফোনের খুব বেশী ব্যবহার হয়।

১৫-১৪. চলবৈদ্যুত বা দোলকুণ্ডলী মাইক্রোফোন :

ক. **কার্যনীতি :** আগে আমরা যে লাউড-স্পীকারের আলোচনা (§ ১৫-৫খ) করেছি, তাকেই বিপরীতমুখী করলে, আমরা দোলকুণ্ডলী মাইক্রোফোন পাই ; এদের যথাক্রমে শাব্দ-মোটর এবং শাব্দ-জেনারেটর

হিসাবে ভাবা চলে। H প্রাবল্যের চৌম্বকক্ষেত্রের সমকোণে l দৈর্ঘ্যের পরিবাহী তারে i মাত্রার বিদ্যুৎ-ধারা পাঠালে পরিবাহী এবং চৌম্বকক্ষেত্র দুয়েরই সমকোণে $F=Hil$ যান্ত্রিক বল পরিবাহীকে নড়ায় (লাউড-স্পীকার); আবার নিষ্প্রবাহ তারে সেই একই দিকে F বল প্রয়োগ করলে তাতে বিপরীতমুখী i মানের বিদ্যুৎ-ধারা চলে (মাইক্রোফোন)। স্পন্দনশীল ছদ থেকে ঝুলন্ত তার চৌম্বকক্ষেত্রে ওঠা নামা করলে তাতে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা আবিষ্ট হয়।

খ. যন্ত্র-বর্ণনা ঃ এর গঠন দোল-কুণ্ডলী লাউড-স্পীকারের মতোই এবং 15.17(a) চিত্রে তার পার্শ্বচিত্র (elevation) দেখানো হয়েছে। N এবং SS যথাক্রমে কেন্দ্রস্তম্ভক বাটির (pot) আকারের এক শক্তিশালী স্থায়ী (বা বৈদ্যুতিক) চুম্বকের উত্তর এবং দক্ষিণ মেরু; 15.9(a) চিত্রে প্ল্যানের মতোই

চিত্র 15.17(a)—চলকুণ্ডলী মাইক্রোফোন

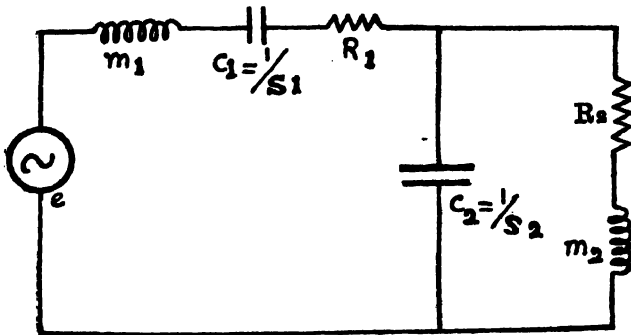
মেরুগুলি বৃত্তাকার। D স্পন্দনশীল ছদটি শক্ত ঢেউ-খেলানো একটি পাত; A ও B দুই স্প্রিংয়ের সাহায্যে সেটি চুম্বকের খাড়া অংশের সঙ্গে আট্‌কানো; এবং কাঠিন্য বাড়ানোয় জন্য D-কে গম্বুজাকৃতি করা হয়। PC শক্ত কাগজের শংকু—তার কাজ শব্দতরঙ্গ সংগ্রহ এবং সংহত করা। ছদ থেকে নিলম্বিত রয়েছে CC বেলন—তার ওপরেই জড়ানো সরু তারের বহু-পাক-বিশিষ্ট দোল-কুণ্ডলী (MC); দোল-কুণ্ডলীবাহী বেলনটি মেরুদ্বয়ের মধ্যবর্তী বায়ুবলয়ে অরীয় চৌম্বকক্ষেত্রে থাকে। চৌম্বক মেরুগুলির তলায় VV বায়ুপ্রকোষ্ঠ; প্রয়োজনীয় শাব্দবর্তনীর তাগিদে এখানে SC, রেশমের ক্ষুদ্র ক্ষুদ্র নালিকা (capillary)-বিশিষ্ট এক শংকু। E ছিদ্রপথে এই বায়ুপ্রকোষ্ঠ বাইরের সঙ্গে সমান চাপ রক্ষা করে।

গ. প্রতিসম বর্তনী এবং তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ ঃ দোল-কুণ্ডলী মাইক্রো-

ফোনের ক্রিয়াকলাপ বুঝতে, এর ছদটিকে m_1 ভরের এবং s_1 (বা μ_1) দার্ঢ্যবিশিষ্ট একটি স্পন্দক হিসাবে আর তার স্পন্দনে R_1 মানের বাধাবল আছে, এই ধ'রে নেওয়া হবে। আপতিত শব্দের চাপবিস্তার p_m এবং আপতন-ক্ষেত্রফল A হলে, দোল-কুণ্ডলীর স্পন্দনবেগ হবে

$$v_1 = \frac{f}{Z_m} = \frac{A p_m e^{j\omega t}}{R_1 + j(m_1\omega - s_1/\omega)} \qquad (১৫\text{-}১৪.১)$$

এর থেকে বোঝা যাচ্ছে যে (১) প্রতিবেদনে বিশ্বস্ততা রাখতে হলে অর্থাৎ সাড়াকে কম্পাংক-নিরপেক্ষ হতে হলে, R_1-কে যথেষ্ট বড় ক'রে স্পন্দনকে রোধ-নিয়ন্ত্রিত করা চাই; তখন মাইক্রোফোনে উৎপন্ন বিভবভেদ আর আপাতিত শাব্দতরঙ্গের কম্পাংকের ওপর নির্ভর করবে না। আবার, (২) বেগবিস্তার বাড়ালে মাইক্রোফোনের বিভব-সুবেদিতা বাড়ে এবং তা পেতে হলে Z_m কমাতে হবে। একসঙ্গে দুই সর্ত মেটানো এই সরল ব্যবস্থায় সম্ভব নয়। তাই স্পন্দকের সঙ্গে আরও শব্দবর্তনী যোগ করা দরকার।

15.17(b) চিত্রে প্রতিসম যান্ত্রিক বর্তনী দেখানো হয়েছে। ছদের স্পন্দনের সঙ্গে তার নিচে এবং চুম্বক-পাত্রের মধ্যবর্তী বায়ুর (VV) স্পন্দন

চিত্র 15.17(b)—দোল-কুণ্ডলী মাইক্রোফোনের প্রতিসম যান্ত্রিক বর্তনী

ঘটে; বায়ুভরের নম্যতা $c_2 (=1/s_2)$ দুই স্পন্দনের মধ্যে যোগসূত্র রচনা করে। রেশম-শংকুর নালিকাগুলির মধ্যে দিয়ে বায়ুস্পন্দন ভর বা জড়তা (m_2) এবং রোধের (R_2) অবতারণা ঘটায়। E নালীর ক্রিয়ায় V প্রকোষ্ঠে

বায়ুর নম্যতা স্থির থাকে। যেহেতু স্পন্দক-দুটির যোজন নম্যতামাধ্যমে হয়েছে তাই তাদের স্পন্দনের সমীকরণ যথাক্রমে দাঁড়াবে

$$m_1\dot{v}_1 + R_1 v_1 + (s_1+s_2)\int v_1 dt - s_1 \int v_1 dt = p_m e^{j\omega t}$$

$$m_2\dot{v}_2 + R_2 v_2 + s_2 \int v_2 dt - s_2 \int v_1 dt = 0 \qquad (১৫\text{-}১৪.২)$$

এখন যেহেতু স্পন্দনবেগ প্রযুক্ত বলের সমকম্পাংক হবেই, আমরা $v_1 = (v_1)_{max}e^{j\omega t}$ এবং $v_2 = (v_2)_{max}e^{j\omega t}$ ধরতে পারি। তার থেকে দুই বেগ, তাদের অবকলিত ও সমাকলিত মানগুলি ১৫-১৪.২ সমীকরণে যথাস্থানে বসিয়ে মাইক্রোফোনের যান্ত্রিক বাধের মান হিসাবে পাব

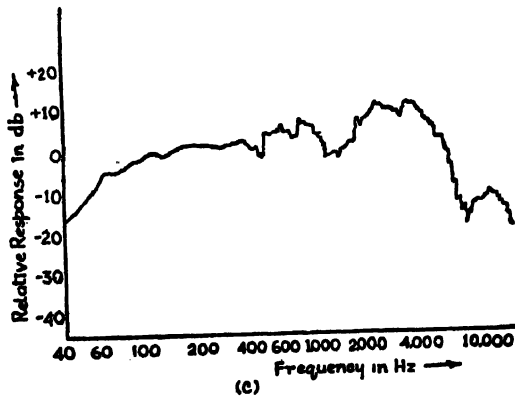
$$Z_m = R_1 + j\left(m_1\omega - \frac{s_1+s_2}{\omega}\right) + \frac{s_2/\omega^2}{R_2 + j(m_2\omega - s_2/\omega)}$$

$$(১৫\text{-}১৪.৩)$$

আবার যেহেতু $s_2 = m_2\omega_2^2$, তাই মাইক্রোফোনের যান্ত্রিক রোধ এবং যান্ত্রিক প্রতিক্রিয়তা যথাক্রমে হবে

$$R_m = R_1 + \frac{s_2^2 R_2}{R_2\omega^2 + m_2^2(\omega^2-\omega_2^2)^2} \qquad (১৫\text{-}১৪.৪ক)$$

$$X_m = \frac{s_1}{\omega} + s_2\omega \cdot \frac{m_2^2(\omega_2^2-\omega^2) - R_2^2}{R_2^2\omega^2 + m_2^2(\omega_2^2-\omega^2)^2} \qquad (১৫\text{-}১৪.৪খ)$$

দুই স্পন্দকের ভর, রোধাংক এবং নম্যতাংক এমনভাবে বেছে নেওয়া হয়

চিত্র 15.17(*c*)—দোল-কুণ্ডলী মাইক্রোফোনে সাড়া-কম্পাংক-লেখ

যাতে মাইক্রোফোন-বাধের মান (Z_m) অনেকটা কম্পাংক-পাল্লা জুড়ে মোটামুটি অপরিবর্তিত থাকে।

15.17(c) চিত্রে সাধারণ দোল-কুণ্ডলী মাইক্রোফোনের কম্পাংক-সাড়া দেখানো হয়েছে ; এতে রেশম-শংকু থাকে না। 45 থেকে প্রায় 1000 চক্র পর্যন্ত এর সাড়া মোটামুটি কম্পাংক-অক্ষের সমান্তরাল অর্থাৎ কম্পাংক-নিরপেক্ষ। এই মাইক্রোফোনের সুবেদিতার মান

$$M_R = \frac{E}{p_m} = \frac{Hlv}{p_m} = \frac{Hl}{Z_s} = \frac{HlA}{Z_m} \qquad (১৫-১৪.৫)$$

এখানে Z_s ছদের বিশিষ্ট শাব্দ বাধ এবং Z_m তার স্পন্দনের যান্ত্রিক বাধ (রাশিগুলি চরম এককে প্রকাশিত)। সুবেদিতার মান 10^{-5} ভোল্টের গুণিতক হয়।

ঘ. গুণাগুণ : এদের বৈদ্যুতিক বাধ মাত্র ২০ ওহ্‌মের মতো হয়। তাই কুণ্ডলীপ্রান্তের বিভবভেদ ট্রান্সফর্মারের সাহায্যে বাড়িয়ে, ভোল্ট-সম্প্রসারকে সরবরাহ করা হয়। এদের প্রতিবেদনে মোটামুটিভাবে কণ্ঠস্বর কম্পাংক-পাল্লায় সমতা রয়েছে, সুবেদিতা যথেষ্ট বেশী এবং ধারক-মাইক্রোফোনের মতো ব্যাটারি-চালিত বহির্বর্তনীর দরকার হয় না। 2000 চক্র কম্পাংক পর্যন্ত এর সাড়া 0 থেকে $\pi/2$-র মধ্যে দিক্‌-নিরপেক্ষ ; এরা শাব্দতীব্রতার শূন্যস্তরের ওপরে 20 থেকে 140 ডেসিবেল পর্যন্ত সাড়া দেয়।

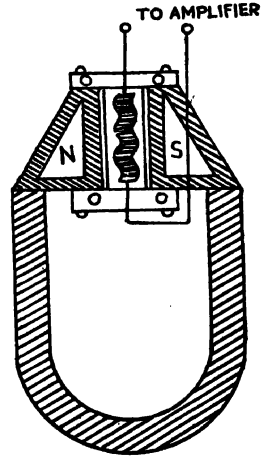
প্রয়োজনের খাতিরে এই যন্ত্রটিতে যথেষ্ট জটিলতা আনতে হয়। দরকার পড়লে, শাব্দ ফিল্‌টার লাগিয়ে নানা অনুনাদের সম্ভাবনাকে দমন করা হয়। এই মাইক্রোফোনেও স্বকীয় অপস্বর থাকে না ব'লে সম্প্রচারের কাজে আজকাল এদের যথেষ্টই ব্যবহার করা হচ্ছে।

অনেকর মতে দোল-কুণ্ডলী মাইক্রোফোন চাপক্রিয় নয়, বরং বেগক্রিয় ; কেননা কুণ্ডলীর স্পন্দনবেগই তো বিদ্যুৎ-চালক বলের উদ্ভব ঘটায়।

১৫-১৫. বেগক্রিয় বা রিবন-মাইক্রোফোন :

ক. প্রাথমিক আলোচনা : এপর্যন্ত আমরা যে-সব চাপক্রিয় মাইক্রোফোনগুলি আলোচনা করলাম তাদের ক্ষেত্রে (১) শাব্দচাপ ছদের মাত্র একদিকেই ক্রিয়া করে এবং (২) উৎপন্ন বল এই চাপের সমানুপাতিক এবং সমদশা। বেগক্রিয় যন্ত্রে শাব্দচাপ ছদের দুই তলেই সক্রিয় এবং উৎপন্ন সক্রিয় বল সচল অংশের দুই তলে চাপের অন্তরের সমানুপাতিক হয়। এই

চাপভেদের প্রবণতা (pressure gradient, $\partial p/\partial x$) ৬-৩.১ সমীকরণের ব্যুৎপত্তি অনুযায়ী কণাবেগের পরিবর্তনের সময়হারের [$\partial\xi/\partial t$] সমান। তাই এই শ্রেণীর যন্ত্রকে চাপভেদ-প্রবণ বা বেগক্রিয় মাইক্রোফোন বলে। **রিবন-মাইক্রোফোন** এই শ্রেণীর।

খ. যন্ত্র-বর্ণনা : আধুনিক সংস্করণে স্পন্দকটি এক ঢেউ-খেলানো অ্যাল্যুমিনিয়াম ছদ (চিত্র 15.18a) ; একে অল্প টানে রাখা হয়, কম্পাংক অল্প। তার দৈর্ঘ্য 1″, প্রস্থ $\frac{1}{16}''$, বেধ $(10^{-4})''$ মাত্র। একটি জোরালো চুম্বকের দুই মেরুর মধ্যে এটি থাকে, দু'পাশে মাত্র 0.003″-এর মতো ফাঁকা। ছদের দুই তলেই শব্দতরঙ্গ পড়তে পারে ; ছদের বেষ্টনী ঘুরে শব্দতরঙ্গ পেছনে যায় এবং দুই তলের মধ্যে চাপভেদ এই অতিক্রান্ত বাড়তি-পথের (l) জন্যেই ঘটে। চাপভেদের কারণে সে দোলে এবং চৌম্বকক্ষেত্রে এই দোলন হওয়ার দরুন তাতে প্রান্তীয় বিভবভেদ আবিষ্ট হয় ; এই বিভবভেদ দোলনবেগের সমানুপাতিক এবং সমদশা। বিবর্ধকের সাহায্যে এই বিভবভেদ বাড়ানো হয়।

চিত্র 15.18(a)
রিবন-মাইক্রোফোন

গ. তাত্ত্বিক আলোচনা : ধরা যাক, $p=p_m \cos(\omega t-\beta x)$ সমতলীয় শব্দতরঙ্গের মাইক্রোফোন ছদের ওপর আপতন-কোণ θ ; এবং সামনের ও পেছনের মধ্যে তরঙ্গের অতিক্রান্ত বাড়তি পথের দৈর্ঘ্য l হচ্ছে। তাই চাপভেদজাত যে বল রিবনের A ক্ষেত্রফল জুড়ে ক্রিয়া করবে, তার মান

$$f=A(-\partial p/\partial x)l \cos\theta \qquad (১৫\text{-}১৫.১)$$

এখন $$-\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left[p_m e^{j(\omega t-\beta x)}\right]=+j\beta p$$

$$\therefore \quad f=jA\beta pl \cos\theta \text{ বা } f=pA\omega l \cos\theta/c \qquad (১৫\text{-}১৫.২)$$

আবার রিবনের বেগের মান হবে

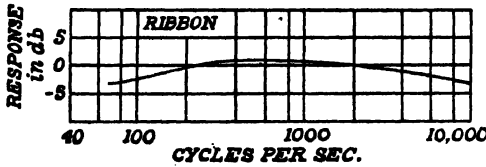
$$v=\dot{\xi}=f/Z_m=f/\omega m=pAl \cos\theta/mc \qquad (১৫\text{-}১৫.৩)$$

এখানে যন্ত্রের গঠন থেকে বোঝা যায় যে, ছদের স্পন্দনে বাধা (R_m) এবং দার্ঢ্যাংক (s) যৎসামান্য ; অতএব বাধ কেবল ভর তথা জাড্যসর্বস্ব। সুতরাং ছদের স্পন্দনবেগ আপতিত তরঙ্গের কম্পাংক-নিরপেক্ষ হবে। 15.18(b) চিত্রে

তাই দেখা যাচ্ছে যে, এই মাইক্রোফোনের সাড়া 40 ~ থেকে 3000 ~ পর্যন্ত কম্পাংক-অক্ষের সমান্তরাল। তার ঊর্ধ্বে অবশ্য সাড়া দ্রুতহারে কমে যায় এবং $l=\lambda$ হলে, শূন্য হয়।

এই মাইক্রোফোনের θ-অভিমুখে সুবেদিতার মান হবে

$$(M_s)_\theta=\frac{E}{p_m}=\frac{Hl'v_n}{p_m}=\frac{Hl'.Al\cos\theta}{mc}$$

$$=(M_s)_0\cos\theta \qquad (১৫\text{-}১৫.৪)$$

চিত্র 15.18(b)—রিবন-মাইক্রোফোনের কম্পাংক-সাড়া-লেখ

এখানে l' স্পন্দনী-ছদের দৈর্ঘ্য আর ১৫-১৫.৩ সমীকরণ থেকে v/p-এর মান বসানো হয়েছে। গোলীয় তরঙ্গের বেলাতেও এই সমীকরণগুলি প্রযোজ্য।

ঘ. গুণাগুণ : এই মাইক্রোফোনের দিঙ্মুখিতা প্রবল। আগের সমীকরণে দেখা যাচ্ছে, আপতন-কোণ (θ) শূন্য, অর্থাৎ লম্ব বরাবর আপতন হলে (স্বনক—মাইক্রোফোনের ঠিক সামনে বা পেছনে থাকলে) এর সাড়া সর্বাধিক ; স্বনক—ছদের সঙ্গে একই তলে থাকলে, $\theta=\pi/2$ হওয়ায়, সে নিঃসাড়। $l=\lambda$ হলে, ছদের সামনে-পেছনে চাপ সমান, সুতরাং $f=0$ হয়ে যায় ; তাই কম্পাংক (n) → c/l-এর কাছাকাছি হলেও সাড়া কমে যেতে থাকে। তাই l-কে আহরিত উচ্চতম শব্দকম্পাংকের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের অর্ধেকের কম হতে হবে।

এর অন্য অসুবিধাগুলি হচ্ছে, উৎপন্ন বিভবভেদ কম হ'লে, বিবর্ধক লাগে ; আর সামান্য বাতাসেই দুলতে পারে ব'লে কাজে বিঘ্ন এবং ত্রুটি আসার সম্ভাবনা খুবই বেশী।

Cardioid মাইক্রোফোন : চাপক্রিয় মাইক্রোফোনের সঙ্গে বেগক্রিয় মাইক্রোফোনের শ্রেণী-সংযোগ ঘটালে আমরা একমুখী (unidirectional) মাইক্রোফোন পাই ; কারণ আমরা দেখলাম যে বেগক্রিয় মাইক্রোফোন দ্বি-মুখী আর চাপক্রিয় মাইক্রোফোন দিক্-নিরপেক্ষ। সুতরাং শ্রেণীসংযুক্ত দুই মাইক্রোফোনের সাড়া হবে

$$(M_s)'_\theta=(M_s)_0\,(1+\cos\theta) \qquad (১৫\text{-}১৫.৫)$$

রিবন-মাইক্রোফোনে আপতন-কোণ-সাড়া-লেখ ∞ আকারের হয়। $90°$ এবং $270°$ আপতন-কোণে যন্ত্র নিঃসাড় থাকে। সংযুক্ত যন্ত্রে আপতন-কোণ-সাড়া-লেখ $[(1+\cos\theta)-\theta]$ ধাঁচের হবে। এই রেখাকে অঙ্কশাস্ত্রে কার্ডিয়য়েড বলে। তাই এই যুক্ত যন্ত্রের নাম কার্ডিয়য়েড মাইক্রোফোন। উচ্চ-কম্পাংক-প্রতিবেদনযুক্ত এই যন্ত্রটি ফলিত স্বনশাস্ত্রের এক বিস্ময়কর অবদান। রঙ্গমঞ্চে এই মাইক্রোফোনের পিছনদিক প্রেক্ষাগৃহের দিকে থাকে; দর্শকদের কোলাহলে সে সাড়া দেয় না, সুতরাং লাউড-স্পীকারে সে শব্দ পৌঁছয় না।

দিঙ্মুখিতা ঃ সংজ্ঞানুসারে রিবন-মাইক্রোফোনের দিঙ্মুখিতা-অনুপাত

$$D=(e^2)_{0-\pi}/(\bar{E})^2_{0-2\pi} \qquad (১৫-১৫.৬)$$

এখানে e হচ্ছে সর্বাধিক সাড়ার দিক্ বরাবর $(0°-180°)$ শব্দতরঙ্গজাত বিভবভেদ, আর $\bar{E}$ হচ্ছে একযোগে সব দিক থেকে আপতিত শব্দতরঙ্গজাত বিভবভেদ; দ্বিতীয়ক্ষেত্রে মোট চাপের বর্গের গড়, প্রথমের সমান। এই অনুপাত আপতিত কম্পাংক-নির্ভর। ১৫-১৫.৪ থেকে

$$D=\frac{(M_s)_0{}^2}{(M_s)_\theta{}^2}=\frac{1/\pi}{(1/2\pi)\int_0^\pi \cos^2\theta \,.\, d(\cos\theta)}$$

$$=\frac{2}{2/3}=3 \qquad (১৫-১৫.৭)$$

তাহলে দিঙ্মুখিতা-সূচক (directivity index) হবে

$$d=10\log D=10\log 3=+4.8 \text{ ডেসিবেল}$$

সুতরাং দ্বি-মুখী রিবন-মাইক্রোফোনের সুবিধাগুলি হচ্ছে ঃ (১) $D=3$ হওয়ায় দিক্-নিরপেক্ষ মাইক্রোফোন থেকে কোন নির্দিষ্ট দূরত্বে উৎস থাকলে যতটা বিভবভেদ উৎপন্ন হবে, দ্বি-মুখী মাইক্রোফোন থেকে তার $1.73\,(=\sqrt{3})$ গুণ দূরে থাকলে ততটাই বিভবভেদ হবে। এই দূরত্বে রাখলে মূল শব্দ, ঘরের অনুরণন ও পশ্চাৎ-পট (background) শব্দ, সবার দরুন উৎপন্ন বিভবভেদ সমান হবে। (২) দুজন বক্তা রিবনের দু'দিকে দাঁড়িয়ে কথা বললে দুজনের কথাই নিরুপদ্রবে সমদক্ষতায় গৃহীত হবে। (৩) রিবন-তলে $(90°-270°)$ কোন স্বনক থাকলে সে-শব্দ গৃহীত হবে না। সুতরাং চলচ্চিত্রে শব্দ রেকর্ড করার কালে এর ব্যবহারে সুবিধাগুলি সহজবোধ্য। রিবন-তলে রাখলে ক্যামেরার চলাকালীন শব্দ সম্পূর্ণভাবে নিবারিত হয়।

১৫-১৬. বিভিন্ন শ্রেণীর মাইক্রোফোনের কৃতির তুলনা এবং নির্বাচনের সর্তাবলী ঃ

শ্রেণী	সুবিধা	অসুবিধা
কান	শক্তসমর্থ, সরল গঠন, নির্ভর-যোগ্য, সস্তা, সর্বাধিক সুবেদী বা সংবেদী, বিবর্ধকের দরকার থাকে না	কম্পাংক-সাড়া-লেখ অসম অর্থাৎ প্রতিবেদনে বিশ্বস্ততার অভাব, অভ্যন্তরীণ বা স্বকীয় অপস্বর যথেষ্ট, কার্বন দানা-গুলির জমাট-বাঁধার প্রবণতা, দিঙ্মুখিতা এবং অনুনাদজ বিকৃতির উপস্থিতি, বহির্বর্তনী থেকে প্রবাহ পাঠানোর দরকার
ধারক	আকারে ছোট্ট, সহজেই স্থানান্তর-যোগ্য, স্বকীয় অপস্বরের অনুপস্থিতি, কম্পাংক-সাড়া-লেখ মোটামুটি বিশ্বস্ত, সামান্য চাপভেদ—এমন-কি স্থির চাপেও সাড়া দেয়	ভঙ্গুর, আর্দ্রতা-প্রভাবিত, দিঙ্মু-খিতা এবং অনুনাদজ বিকৃতির প্রবণতা, উচ্চবাধযুক্ত, সুতরাং বিবর্ধক বা সম্প্রসারকের দরকার
স্ফটিক	আকারে ছোট্ট, অপস্বর অনুপস্থিত, কম্পাংক-সাড়া-লেখের বিশ্বস্ততা উচ্চমানের, মোটামুটিভাবে দিক্-নিরপেক্ষ	উৎপাদিত বিভবভেদ সামান্য, উচ্চবাধের দরুন সম্প্রসারকের দরকার, ভঙ্গুর, উষ্ণতা ও আর্দ্রতা প্রভাবিত
দোল-কুণ্ডলী	স্বকীয় অপস্বর অনুপস্থিত, সুবেদিতা উচ্চমানের এবং নির্ভরযোগ্য, কম্পাংক-সাড়া-লেখে বিশ্বস্ততা যথেষ্ট, উষ্ণতা, আর্দ্রতা ও দিক্-নিরপেক্ষ	কম্পাংক-নির্বাচনে ত্রুটি, অশক্ত (delicate), বাতাসে দোলনের কারণে অযথার্থ বিভবভেদ উৎপত্তির সম্ভাবনা
রিবন	অপস্বরের অনুপস্থিতি, নির্ভর-যোগ্য প্রতিবেদন, কম্পাংক-সাড়া-লেখে উচ্চমানের বিশ্বস্ততা, কম্পাংক-নির্বাচনের প্রবণতা নেই	সামান্য উৎপাদ, সুতরাং সম্প্র-সারকের দরকার, বায়ুতে দোলনের সম্ভাবনা, প্রবল দিঙ্মুখিতা

মাইক্রোফোনগুলির উৎপাদের তুলনাঃ এদের স্পন্দনীছদের ওপর আপতিত একক শাব্দচাপে, অবিকৃত শাব্দক্ষেত্রে খণ্ডিত-বর্তনীতে উৎপন্ন প্রান্তীয় বিভবভেদ দিয়ে, সাড়া বা প্রতিবেদন মাপা হয়। 1 ভোল্ট/1 মাইক্রোবার * এই অনুপাতকে মাত্রক-স্তর ধরে নিয়ে এই মান ডেসিবেলে প্রকাশিত হয়। উৎপন্ন বিভবভেদ E ভোল্ট, আপতিত শাব্দচাপ p মাইক্রোবার হলে, ডেসিবেল সাড়া হয়

$$n \text{ ডেসিবেল} = 20 \log_{10}(E/p)$$

যদি সাড়া দিঙ্মুখী হয় তাহলে মাইক্রোফোন-অক্ষ এবং স্বনকের অভিমুখ, এই দুয়ের মধ্যবর্তী কোণ (θ) উল্লেখ করা দরকার। নীচের সরণীতে মাত্রক 1000 ~ কম্পাংকে ভিন্ন ভিন্ন শ্রেণীর মাইক্রোফোনের প্রতিবেদন-মাত্রা এবং আনুমানিক অভ্যন্তরীণ বাধের মান দেখানো হয়েছে—

শ্রেণী	ভোল্টেজ সাড়া ডেসিবেলে	আন্তর্বাধ ওহ্‌মে	শ্রেণী	ভোল্টেজ সাড়া ডেসিবেলে	আন্তর্বাধ ওহ্‌মে
কার্বন	-45	100	দোল-কুণ্ডলী	-85	10
ধারক	-50	5×10^5	রিবন	-105	< 1
স্ফটিক	-50	10^5	কার্ডিয়য়েড	-82	10

মাইক্রোফোন-নির্বাচনঃ প্রয়োগক্ষেত্র বুঝে করা দরকার। অল্প তীব্রতার শাব্দস্তর মাপতে হলে স্বকীয় অপস্বর যথাসম্ভব কম হওয়া চাই। তাই রোচেল-স্ফটিক এবং দোল-কুণ্ডলী মাইক্রোফোনের এক্ষেত্রে অগ্রাধিকার। শূন্য শাব্দস্তর সাপেক্ষে 20 ডেসিবেল পর্যন্ত এরা মাপতে পারে। পক্ষান্তরে উচ্চ-তীব্রতায় (140 db পর্যন্ত) এরা ছাড়াও ধারক মাইক্রোফোনও চলে। অল্প কম্পাংকের সন্ধানে স্ফটিক এবং ধারক শ্রেণীর ব্যবহারই বিধেয়। উচ্চ-

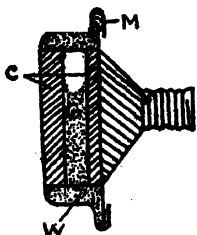
* স্বভাবী বায়ুমণ্ডলীয় চাপ $= 1$ বার $= 10^6$ ডাইন/বর্গ-সেমি। তাই 1 মাইক্রোবার $= 10^{-6}$ বার $= 1$ ডাইন/সেমি^{2}

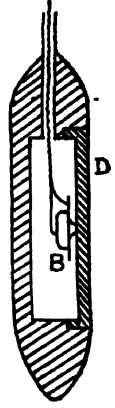
কম্পাংকে ধারক মাইক্রোফোন 12000 চক্র পর্যন্ত এবং তদূর্ধ্বে ছোট্ট ছোট্ট স্ফটিক দিয়ে তৈরী মাইক্রোফোন ভালো। বেশী উষ্ণতায় দোল-কুণ্ডলী, রিবন- এবং ধারক-মাইক্রোফোন কার্যকরী। আর্দ্রতা, স্ফটিক ও ধারক মাইক্রোফোনের কাজের পরিপন্থী। রিবন বা দোল-কুণ্ডলী মাইক্রোফোনের বাধ কম ব'লে তাদের ক্ষেত্রে লম্বা লম্বা সংযোগী তার ব্যবহার করা যায়—কেননা সম্মিলিত বাধ বেশী হয় না।

১৫-১৭. বারি-শব্দগ্রাহী (Hydrophones):

জলের গভীরে শব্দসন্ধান উপরোক্ত সব নীতিতেই হতে পারে, কিন্তু কার্যকরী পন্থাগুলি গুণগতভাবে ভিন্ন—কেননা বায়ুর তুলনায় জল-মাধ্যমের শাব্দ-বাধ (ρc) প্রায় 3750 গুণ বেশী। শব্দতরঙ্গে তীব্রতা 6-6.4 সমীকরণ অনুযায়ী $I = p_{rms}^2/\rho c = \frac{1}{2}\rho c\, n^2 a^2$, অর্থাৎ সরণ-বিস্তার $a \propto 1/\sqrt{\rho c}$; তা হলে যথাযোগ্য মান বসিয়ে দেখা যাবে যে, সমতীব্রতা ও সমকম্পাংক শব্দে জলকণার সরণ-বিস্তার বায়ুকণার সরণ-বিস্তারের মাত্র 61 ভাগের একভাগ মাত্র। সুতরাং যেখানে বায়ুতে সরণক্রিয় যন্ত্র (তপ্ত-তার মাইক্রোফোন) সর্বাধিক সুবেদী, সেখানে জলে সবচেয়ে সুবেদী হয় চাপক্রিয় যন্ত্র। এই ধরনের যন্ত্রেরাই জলে হাইড্রোফোন, বায়ুতে মাইক্রোফোন।

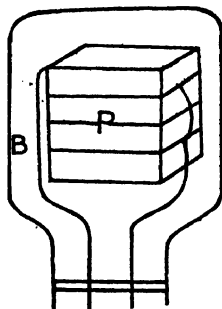
চাপক্রিয় শ্রেণীর মধ্যে কার্বন-গুটি (button) হাইড্রোফোনের ব্যবহারই সর্বাগ্রে হয়েছিল। আজকাল ভাল্‌ভ্‌-সম্প্রাসরকের কল্যাণে চলবৈদ্যুত, চাপবৈদ্যুত- এবং চৌম্বকতাত-চালিত হাইড্রোফোনের প্রচুর ব্যবহার হচ্ছে। আমরা একে একে প্রথম তিনটির আলোচনা ক'রবো। শেষেরটি ২০ অধ্যায়ে বর্ণিত হবে।

ক. কার্বন-গুটি হাইড্রোফোন: 15.19(a) চিত্রে মোটা পর্দায় স্ক্রু দিয়ে আটকানোর উপযোগী একটি ছোট কার্বন মাইক্রোফোন দেখানো হয়েছে। ছোট্ট একটি পিতলের ক্যাপসুলে বসানো দুই মসৃণ কার্বন-পাতের (CC) মাঝের জায়গার (G) দুই-তৃতীয়াংশ বিশেষভাবে তৈরী কার্বনদানায় ভর্তি। একটি কার্বন-পাত পিতলের গায়ে আটকানো, অপরটি একটি অভ্র-স্পন্দকের (M) সঙ্গে লাগানো। নরম ফেল্টের একটি বেষ্টনী (W) কার্বন-পাতগুলিকে ঘিরে অভ্র-ছদটিকে আলগা ক'রে চেপে রাখে। তার স্ক্রু টি দিয়ে মাইক্রোফোনটি (B) হাইড্রোফোনের (চিত্র 15.19b) মোটা পর্দা D-র সঙ্গে যুক্ত।

চিত্র 15.19(a)
কার্বন বারি-শব্দগ্রাহী

হাইড্রোফোনটি একটি ভারী ধাতুর তৈরী লেন্স্-আকারের প্রকোষ্ঠ-বিশেষ; তার মধ্যে একটি অগভীর গহ্বরে মাইক্রোফোন (B) বসানো থাকে; গহ্বর-মুখটি মোটা রবার বা ধাতুর পাত (D) দিয়ে জলনিরন্ধ্রভাবে আট্কানো থাকে। জলবাহিত শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় D কাঁপে; সেই স্পন্দন, স্ক্রুর সহায়তায় মাইক্রোফোনকে সক্রিয় করে। দুই পাত থেকে প্রবাহবাহী তার ব্যাটারী ও ট্র্যান্স্ফর্মারের মারফতে বৈদ্যুতিক ধারাভেদ শ্রবণস্থানে টেলিফোন গ্রাহকে পৌঁছে দেয়। যন্ত্রটি জাহাজের হাল থেকে, হয় ঝোলানো থাকে, না হয় তাতে বাঁধা থাকে, নয়তো হালের গায়ে চৌরস (flush) ক'রে বসানো থাকে, এমন-কি প্রয়োজনবশে হালের মধ্যে ছোট্ট জলাধারে ডোবানো থাকে।

চিত্র 15.19(b)

খ. ফেসেনডেন-উদ্ভাবিত চল-বৈদ্যুত হাইড্রোফোন: এই যন্ত্রে একটি তামার নল অত্যন্ত শক্তিশালী এক অরীয় চৌম্বকক্ষেত্রে নড়াচড়া করতে পারে। তামার নলের সঙ্গে ইস্পাতের একটি স্পন্দনীছদ যুক্ত। ছদটি জলের সংস্পর্শে থাকায় শব্দতরঙ্গের আপতনে সে যখন নড়ে তখন অরীয় চৌম্বকক্ষেত্রে নলটিও নড়াচড়া করতে থাকে। নলটির খুব কাছেই, তাকে ঘিরে চৌম্বক মেরুমুখ (চল-কুণ্ডলী গ্যালভ্যানোমিটারের মতো) এবং তার ওপরে সরু তারকুণ্ডলী জড়ানো থাকে। চৌম্বকক্ষেত্রে নলের স্পন্দন হওয়ায় তাতে বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় আবেশে বিদ্যুৎ-ধারার উৎপত্তি হয়; এই ধারা স্বভাবে প্রত্যাবর্তী এবং পরিমাণে প্রবল, কেননা তামার নলের রোধ খুবই কম। ট্র্যান্স্ফর্মার-ক্রিয়ায় এই ধারা বহুগুণে বেড়ে তার-কুণ্ডলীতে স্থানান্তরিত হয় [নলটিকে ট্র্যান্স্ফর্মারের এক পাকের মুখ্য (P) এবং মেরু-কুণ্ডলীর বহু পাককে গৌণ (S) বর্তনী ধরা যায়]। উৎপন্ন বিভবভেদ, সম্প্রসারক মারফতে টেলিফোন বা অন্য কোন শব্দগ্রাহীকে সক্রিয় করতে পারে।

গ. চাপবৈদ্যুত হাইড্রোফোন: বারিচাপে চাপবৈদ্যুত-স্ফটিক যে সক্রিয় হয় তা প্রথম (১৯১৬) ফরাসী বিজ্ঞানী ল্যাঞ্জেভিন দেখিয়েছিলেন। 15.20 চিত্রে প্রয়োজনীয় শাব্দ-যান্ত্র রূপান্তরকটি দেখানো হয়েছে। এটি লিথিয়াম সালফেট বা বেরিয়াম টাইট্যানেটের এক পাঁজা (stack) স্ফটিক-পাত। তারা (P) সংখ্যায় ছ'টি এবং তাদের মাপ $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{32}$ ঘন ইঞ্চি এবং বৈদ্যুতিক সংযোগ পরস্পর সমান্তরালে। একটি রেড়ীর তেলের পাত্রে

(*B*) পাঁজাটি ডোবানো এবং পাত্রটি নরম নিওপ্রীনে তৈরী। সে একাধারে স্পন্দনশীল ছদ এবং তৈলাধার। *P*-পাঁজাটি একটি *rho-c* রবারের নরম আসনে বসানো থাকে। এই দুই পদার্থেরই বিশিষ্ট বাধ জলের সমান হওয়ায়, জল থেকে আহরিত শাব্দচাপ প্রায় অক্ষুণ্ণ মানেই *P*-তে পৌঁছায়। উৎপন্ন যান্ত্রিক বিকৃতি বিভবভেদে রূপান্তরিত হয়ে সম্প্রসারকের মারফতে টেলিফোনে পৌঁছয়।

চিত্র 15.20
চাপবৈদ্যুত বারি-শব্দগ্রাহী

তিন শ্রেণীর যন্ত্রই বিপরীতমুখে অর্থাৎ ব্যাতিহারী পন্থায় ক্রিয়া করলে জলমধ্যে জোরালো স্বনকের ভূমিকা নিতে পারে।

প্রশ্নমালা

১। সুরশলাকার স্পন্দনরীতি ব্যাখ্যা ক'রে বোঝাও। তার কম্পাংকের ব্যঞ্জক প্রতিষ্ঠা কর। স্বনক হিসাবে এর এত গুরুত্ব কেন? এর স্পন্দন কি-ভাবে লালিত হয় এবং আত্মনিয়ন্ত্রিত স্পন্দন কি ক'রে সম্ভব?

২। তাপশক্তি কি. কি ভাবে স্পন্দনশক্তিতে রূপান্তরিত করা যায়? ট্রেভেলিয়ান-দোলক সম্বন্ধে এক সংক্ষিপ্ত টীকা লেখ।

৩। কি কি নীতিতে লাউড-স্পীকার সক্রিয় করা যায়? দোল-কুণ্ডলী লাউড-স্পীকারের গঠন ও কার্যপ্রণালী ব্যাখ্যা কর। সরাসরি-বিকিরক এবং শিঙাযুক্ত লাউড-স্পীকারের মধ্যে পার্থক্য কি এবং দ্বিতীয়টি কি-ভাবে প্রথমটির চেয়ে বেশী কার্যকরী হয়, বুঝিয়ে বল। লাউড-স্পীকারে কি জাতীয় শক্তি-রূপান্তরণ ঘটে?

৪। স্বনক ও মাধ্যমের মধ্যে যোজন-ব্যবস্থা কি ধর্মের ওপর নির্ভর করে? মাধ্যমে শক্তি-সংক্রমণের হারই বা কিসের ওপর নির্ভর করে? বিকিরণ-বাধ কি, বুঝিয়ে বল। তার প্রকৃতি শাব্দ না যান্ত্রিক?

৫। উৎস-সামর্থ্য কাকে বলে? ভিন্ন ভিন্ন আদর্শ স্বনকে তার সঙ্গে শাব্দ তীব্রতার সম্পর্ক কি? সরল ও যুগ্ম শাব্দ-উৎস কাকে বলে? যুগ্ম উৎসকে কি-ভাবে একক উৎসে পরিণত করা যায়? সে দুর্বল বিকিরক কেন? যুগ্ম থেকে একক উৎসে পরিণত করার কয়েকটি উদাহরণ দাও। কি কি সর্তাধীনে বাস্তব উৎস আদর্শ উৎসের মতো আচরণ করবে? এই প্রসঙ্গে নিরস্তকের ভূমিকা কি?

৬। বিকিরণ-রোধ এবং -প্রতিক্রিয়তা বলতে কি বোঝ? স্বনক থেকে শব্দপ্রেরণে তাদের ভূমিকা কি? বিদ্যুৎপ্রবাহে choke-কুণ্ডলীর আচরণের সঙ্গে এদের কোন সাদৃশ্য পাও কি?

৭। শব্দসন্ধানীদের শ্রেণীভেদ, কার্যনীতি এবং দক্ষতা সম্বন্ধে সাধারণভাবে আলোচনা কর। তপ্ত-তার মাইক্রোফোনের গঠন, ক্রিয়া এবং প্রয়োগ সম্বন্ধে বিস্তারিত বর্ণনা লেখ।

৮। শক্তির রূপান্তরক কাকে বলে? মাইক্রোফোনে কি জাতীয় শক্তি-রূপান্তরণ হয়? সাধারণ মাইক্রোফোনে এই রূপান্তরণ কি কি ধাপে হয় এবং কারা ঘটায়, তা নির্দেশ কর।

মাইক্রোফোনের কি কি গুণ থাকা বাঞ্ছনীয়? প্রতিটি বৈশিষ্ট্য কি বোঝায়, তা সংক্ষেপে আলোচনা কর।

৯। মাইক্রোফোনগুলিকে কার্যকরী নীতি সাপেক্ষে শ্রেণীবিন্যাস কর। প্রতিটি শ্রেণীর তুলনামূলক বৈশিষ্ট্য বিচার ক'রে নির্দেশ কর যে—(ক) অতি বিশ্বস্তভাবে শব্দলিপিগ্রহণ, (খ) দূরভাষণ, (গ) শ্রবণবন্ধু, (ঘ) গণসমাবেশে ভাষণের কাজে কোন্ কোন্ মাইক্রোফোন ব্যবহার করবে?

১০। কার্বন-মাইক্রোফোনের সম্বন্ধে বিশদ আলোচনা কর। তার কৃতির বৈশিষ্ট্য কি?

১১। স্ফটিক-মাইক্রোফোনের কার্যনীতি আলোচনা কর। এদের ক্ষেত্রে কোয়াৎ´জের ব্যবহার হয় না কেন? এদের কি কি শ্রেণীভেদ সম্ভব?

১২। জলের তলায় শব্দগ্রহণের সঙ্গে বায়ুতে শব্দসন্ধানের মৌলিক পার্থক্য আলোচনা কর। সেজন্য শব্দগ্রাহকের নির্মাণ-কৌশলে কি পরিবর্তন দরকার হয়? একটি বারি-শব্দগ্রাহী বর্ণনা কর।

এক্ষেত্রে চাপবৈদ্যুত উপাদানের ব্যবহার কি সম্ভব?

১৩। বেগক্রিয় মাইক্রোফোনের ক্রিয়ানীতি বর্ণনা কর। কোন্ বিশেষ উদ্দেশ্যে এর ব্যবহার উপযোগী এবং কেন? একে চাপভেদ (pressure gradient) মাইক্রোফোন বলা হয় কেন?

এইজাতীয় মাইক্রোফোনের দিঙ্মুখিতা কি-ভাবে কার্ডিয়য়েড-ধর্মী করা যায়? তাতে সুবিধা কি?

১৪। একটি জনসমাবেশে ভাষণ-ব্যবস্থার পূর্ণ বর্ণনা দাও এবং তাদের প্রতিটি প্রধান অংশের ভূমিকা ব্যাখ্যা কর।

১৬

শব্দতরঙ্গের বিশ্লেষণ

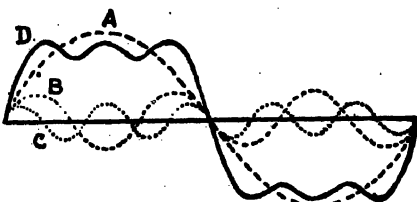
(Analysis of Sound Waves)

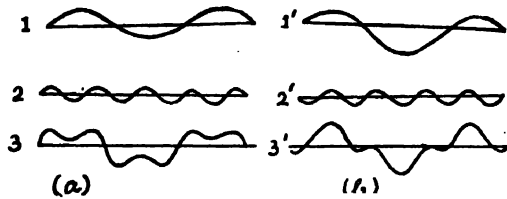
১৬-১. সূচনা :

শব্দতরঙ্গের বিশ্লেষণ বলতে আমরা তিনটি ভৌত বৈশিষ্ট্যের আলোচনা ক'রবো—তারা যথাক্রমে (১) শব্দতরঙ্গের গড়ন, (২) শব্দবাহী মাধ্যমের কোন এক স্তরের এক সেকেণ্ডে কম্পনসংখ্যা, আর (৩) সেই স্তরের মধ্যে দিয়ে শক্তি-অতিক্রমণের সময়-হার। প্রথমটিকে তরঙ্গরূপ (waveform), দ্বিতীয়টিকে তরঙ্গকম্পাংক, তৃতীয়টিকে মাধ্যমের কোন বিন্দুতে শাব্দতীব্রতা (intensity) বলা যেতে পারে। প্রসঙ্গক্রমে, এরা যথাক্রমে সুরেলা শব্দ বা সুস্বরের তিনটি অনুভূতিসাপেক্ষ বৈশিষ্ট্য—স্বনজাতি, স্বনতীক্ষ্ণতা, স্বনপ্রাবল্যের সঙ্গে অঙ্গাঙ্গিভাবে জড়িত ; পরের অধ্যায়ে এই তিন ভৌত বা নৈর্ব্যক্তিক (objective) ধর্ম আর যথাসংশ্লিষ্ট ব্যক্তিসাপেক্ষ (subjective) অনুভূতির মধ্যে সঠিক সম্পর্ক আলোচিত হবে।

এই অধ্যায়ে আমরা তরঙ্গরূপ, তার কম্পাংক এবং তীব্রতার সংজ্ঞা, প্রভাবক এবং পরিমাপ-প্রণালীর কথা শিখব। শব্দ তরঙ্গধর্মী ব'লে সেই তরঙ্গেরও গড়ন, দৈর্ঘ্য ও স্পন্দনবিস্তার আছে—তারাই যথাক্রমে শব্দের তিন আনুভূতিক বৈশিষ্ট্যের—জাতি, তীক্ষ্ণতা ও প্রাবল্যের প্রতীক।

১৬-২. সংজ্ঞা ও ব্যাখ্যা :

স্বনকের **কম্পন-প্রকৃতির ওপরই শব্দতরঙ্গের গড়ন** বা রূপ নির্ভর করে। কম্পন সরল দোলন-জাতীয় হলে তরঙ্গগড়ন সমঞ্জস অর্থাৎ সাইন-জাতীয় (চিত্র *5.5*) হবে। অন্য যেকোন ধরনের স্পন্দনেই স্পন্দনরীতি একাধিক, কাজেই কম্পাংকও একাধিক (চিত্র 12.6) ; কাজেই একাধিক তরঙ্গের উৎপত্তি এবং উপরিপাতন হয়ে জটিল তরঙ্গ-রূপের সৃষ্টি হয় ; এই ব্যাপার ফুরিয়ার উপপাদ্য (§ 10-11) আলোচনাকালে আমরা দেখেছি। 10.17 চিত্রে বিভিন্ন বাদ্যযন্ত্রে উৎপন্ন জটিল শব্দতরঙ্গের রূপ দেখানো হয়েছে।

চিত্র 16.1—সাইন-তরঙ্গের উপরিপাতনে উৎপন্ন জটিল তরঙ্গরূপ

যেকোন তরঙ্গেরই গড়ন, তার আঙ্গিক স্পন্দনগুলির মোট সংখ্যা, প্রতিটির স্বকীয় কম্পাংক এবং বিস্তার আর তাদের মধ্যে পারস্পরিক দশান্তরের ওপর নির্ভরশীল। যেমন 16.1 চিত্রে তরঙ্গরূপ D, তিনটি সাইন-তরঙ্গ A, B ও C-র সমাপতনে উৎপন্ন ; আঙ্গিক তরঙ্গগুলি সমজাতীয় হলেও, তিনটিরই বিস্তার এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য আলাদা আলাদা। আসলে তারা তিনটি সমমেল— A মূল বা নিম্নতম কম্পাংকের এবং B ও C যথাক্রমে দ্বিগুণ এবং ত্রিগুণ কম্পাংকের তরঙ্গরূপ। 10.20(b) এবং 10.22(b) চিত্রে 3, 10 এবং

চিত্র 16.2—সমগড়নের দশান্তরী স্পন্দনের উপরিপাতনের লেখচিত্র

15টি সরল দোলীয় তরঙ্গরূপ জুড়লে স্পন্দনরেখা তথা তরঙ্গরূপ কি-ভাবে বদলায় তা দেখানো হয়েছে। 16.2 চিত্রে 1,1′ এবং 2,2′ তরঙ্গ-যুগ্ম একই গড়নের ; (a) এবং (b) চিত্রে 3 এবং 3′ তাদের ভিন্ন ভিন্ন দশায় উপরিপাতিত রূপ—তারা আলাদা চেহারার।

উৎপন্ন শব্দের **স্বনজাতি** এই **তরঙ্গরূপের** ওপর নির্ভর করে।

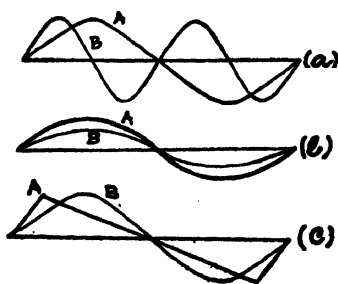
সুরেলা শব্দের উৎপত্তি হতে হলে শব্দতরঙ্গ আকারে নিয়মিত হওয়া চাই। এই শব্দ সাধারণত শ্রুতিমধুর। এইজাতীয় শব্দের সর্বপ্রধান বৈশিষ্ট্য তীক্ষ্ণতা ; **তীক্ষ্ণতা আর স্বনকের কম্পাংক প্রায় সমার্থক** ধরা যায়। স্বনকের একবার স্পন্দনে একটি পূর্ণতরঙ্গের উৎপত্তি হয় এবং এক সেকেণ্ডে যতবার কম্পন হয় ততগুলি তরঙ্গ উৎপন্ন হয় ; তারা যতখানি জায়গা জুড়ে থাকে তা হ'ল তরঙ্গবেগ। সুতরাং তরঙ্গবেগ (c) = স্বনকের কম্পাংক (n) × তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) ; ডানের রাশি-দুটির মধ্যে ব্যতিহার সম্পর্ক। সাধারণত স্বনকের কম্পাংক তার আকৃতি এবং উপাদানের ওপর নির্ভর করে।

শব্দবাহী মাধ্যমের যেকোন স্তরের মধ্যে দিয়ে শক্তির উত্তরণ হয়। কোন একক ক্ষেত্রের মধ্যে দিয়ে লম্বভাবে এক সেকেণ্ডে যতখানি স্পন্দনশক্তি যায়, তা হচ্ছে ঐ ক্ষেত্রস্থ কোন বিন্দুতে **শাব্দ তীব্রতার** মান (চৌম্বক বা

বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে তীব্রতার সঙ্গে তুলনা কর)। রাশিটি আবার, লম্বমুখে একক ক্ষেত্র অতিক্রামী শক্তির প্রবাহও বটে ; তাই একে স্বনকের গড় **শাব্দক্ষমতাও** বলে। শাব্দক্ষেত্রের δS অংশ দিয়ে লম্বভাবে প্রতি সেকেণ্ডে δW পরিমাণ শক্তি প্রবাহিত হলে, এই সংজ্ঞানুসারে গড় শাব্দতীব্রতা বা শাব্দক্ষমতার মান $I_{av} = \delta W/\delta S$ হবে। δS অত্যণুমান হলে, ব্যাপ্তিমুখে শাব্দক্ষেত্রের যেকোন বিন্দুতে শাব্দতীব্রতার মান (৬-৬.১ দেখ)

$$I_a = Lt_{\delta S \to 0}\, \delta W/\delta S = dW/dS$$

এই আকারে প্রকাশ করা যায়। সুরেলা শব্দের প্রাবল্য প্রধানত তীব্রতার ওপর নির্ভরশীল।

দুটি স্পন্দনের কাল-সরণ-রেখা থেকে বা শব্দবাহী মাধ্যমের দেশ-সরণ-রেখা থেকে উৎপন্ন দুই শব্দতরঙ্গের তীব্রতা, তরঙ্গদৈর্ঘ্য (বা কম্পাংক) এবং তরঙ্গরূপের তফাৎ খুব সহজেই বোঝা যায়। 16.3 চিত্রের তিনটিতেই সমদশা দুই তরঙ্গ (A,B) দেখানো হয়েছে। প্রথমটিতে দুই তরঙ্গই সমবিস্তার এবং সমজাতি (এখানে সরল দোলীয়) কিন্তু তাদের তরঙ্গদৈর্ঘ্য আলাদা $(\lambda_A > \lambda_B)$; তাই তাদের কম্পাংকও আলাদা $(n_A < n_B)$। দ্বিতীয় চিত্রে তারা সমদৈর্ঘ্য অর্থাৎ অভিন্ন কম্পাংক এবং সমজাতি কিন্তু ভিন্ন বিস্তার $(a_A > a_B)$; তাই A স্বনকের শাব্দ তীব্রতা B-র চেয়ে বেশী। আর তৃতীয় চিত্রে তরঙ্গদ্বয় সমবিস্তার ও সমদৈর্ঘ্য, অর্থাৎ তাদের তীব্রতা এবং কম্পাংক সমানই ; কিন্তু তাদের তরঙ্গরূপ আলাদা হওয়ায় তাদের স্বনজাতি আলাদা।

চিত্র 16.3—দুই তরঙ্গের ভৌতধর্মের প্রভেদ নির্দেশ

১৬-৩. শব্দের বিশ্লেষণ : সাধারণ আলোচনা :

শাব্দক্ষেত্রের কোন বিন্দুতে শব্দতরঙ্গের ফুরিয়ার-আঙ্গিকগুলির কম্পাংক, বিস্তার এবং দশাভেদ নির্ণয় করতে পারলেই তরঙ্গকে সুনিশ্চিতভাবে চিহ্নিত করা যায়। শব্দতরঙ্গের ক্রিয়ায় সন্ধানী যন্ত্রে সূচীর নির্দিষ্ট বিচলন ঘটবে—যেমন স্কেলের ওপরে আলোর সরণ ; সেই বিচলনকে, নির্ণেয় বৈশিষ্ট্যের দরুন যন্ত্রের সাড়া বা **প্রতিবেদন** বলে। ধরা যাক, আপতিত তরঙ্গের আঙ্গিক সুরগুলির কম্পাংক আলাদা আলাদা, কিন্তু বিস্তার সবারই সমান ;

তাকে ঠিকমতো বিশ্লেষণ করতে হলে গোটা কম্পাংকপাল্লার সর্বত্রই সন্ধানী যন্ত্রের প্রতিবেদন বা সাড়া সমান এবং বিশ্বস্ত হতে হবে। তা ছাড়া, সাড়া কম্পাংক-নিরপেক্ষ হতে হবে এবং শব্দাঘাতে বিক্ষুব্ধ কণার সরণের সঙ্গে যন্ত্রের নির্দেশী সূচীর সরণের সম্পর্ক জানা থাকবে। এইসব সর্ত পুরোপুরি মেনে চলার কয়েকটি অসুবিধা আছে—

(১) আপতিত শব্দকম্পাংক যন্ত্রের স্পন্দন-কম্পাংকের সমান বা তার অখণ্ড গুণিতক হলে অনুনাদ ঘটবে এবং সাড়া, তুলনায় অনেক বেশী জোরালো হবে ; এইরকম বিবর্ধিত সাড়ার ঘটনাকে **প্রতিবেদন-বিকৃতি** বলে। অনেক যন্ত্রে এইরকম একাধিক অনুনাদী কম্পাংক—সুতরাং একাধিক কম্পাংক-বিকৃতির সম্ভাবনা থাকে।

(২) সাধারণ শব্দে বায়ুকণার সরণবিস্তার যৎসামান্যই ($\simeq 10^{-6}$ মিমি) হয় ; কাজেই যন্ত্রে গ্রহণীয় সাড়া পাওয়া দুরূহ ব্যাপার, এবং তাই

(৩) অনেক যন্ত্রেই সাড়া বাড়াতে শিঙা জোড়া হয়—তাতে অনুনাদ ও উদ্ভূত বিকৃতির সম্ভাবনা বাড়ে।

তীব্রতা মাপার তুলনায়, দশা এবং কম্পাংক মাপা অনেক সহজ কাজ। জটিল শব্দতরঙ্গের আঙ্গিকগুলি পেতে হলে, সবার আগে সেই তরঙ্গের গড়ন বা আকৃতি জানা চাই। সুতরাং আমরা সর্বাগ্রে শব্দতরঙ্গের মুদ্রণ-পন্থাগুলি আলোচনা ক'রবো ; তারপর সেই তরঙ্গরূপের বিশ্লেষণ করার পদ্ধতিগুলি শিখব—তারপর কম্পাংক এবং তীব্রতার মাপন-পদ্ধতি।

১৬-৪. শব্দতরঙ্গ-মুদ্রণ বা সংগ্রহণ ঃ

স্পন্দনক্ষম ছদে শব্দতরঙ্গ পড়লে চাপভেদের ক্রিয়ায় তার কম্পন হতে থাকে। সেই স্পন্দনের কাল-সরণরেখাই তরঙ্গের গড়নবৈশিষ্ট্যের প্রতিভূ। কাল-সরণ-রেখা চিত্রিত করাই শব্দতরঙ্গের মুদ্রক বা সংগ্রাহকের কাজ ; এর তিনটি মুখ্য পদ্ধতি—বৈদ্যুতিক, আলোকরৈখিক এবং যান্ত্রিক। এদের মধ্যে প্রথমটি সর্বাধুনিক এবং প্রায় ত্রুটিমুক্ত, আর শেষেরটি প্রাচীনতম এবং বহুত্রুটিসম্বলিত। প্রতিটি পদ্ধতির একটি ক'রে যন্ত্র বর্ণিত হবে।

ক. ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখ (C. R. O.) ঃ আগে ১০-৯ (ক) অনুচ্ছেদে যন্ত্রটির কার্যপদ্ধতি আলোচিত হয়েছে ; ধারক-মাইক্রোফোন (§১৫-১২) এবং বিকৃতিমুক্ত ভাল্‌ভ্‌-সম্প্রসারক যোগে ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখই সবচেয়ে নিখুঁত শব্দসংগ্রাহক। মাইক্রোফোনের ছদে প'ড়ে শব্দতরঙ্গ যে

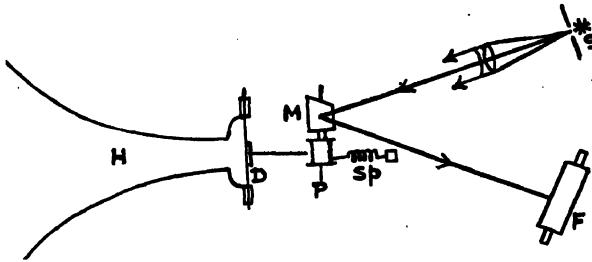
প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা উৎপন্ন করে, ভাল্‌ভ্‌-সম্প্রসারক তাকে বিবর্ধিত ক'রে দোলন-লিখের একজোড়া পাতে (10.14 চিত্রে) পৌঁছে দেয়; ধরা যাক, তার (Y_1Y_2) ক্রিয়ায় দোলন-লিখের প্রতিপ্রভ পর্দায় নির্দেশক আলোকবিন্দু খাড়া-রেখায় ওঠা-নামা করছে। দোলন-লিখের অপর পাতজোড়া (X_1X_2) একটি রোধ-ধারক যুগ্মের (RC-sweep circuit) সাহায্যে বৈদ্যুতিক উৎসের সঙ্গে শ্রেণী-সমবায়ে যুক্ত; এই বর্তনীর আঙ্গিকগুলির মান এমনভাবে নিয়ন্ত্রিত যে, ধারকটি আহিত হয় ধীরে কিন্তু ক্ষরিত হয় খুব দ্রুত—এই ক্রিয়ায় সচল আলোকবিন্দু আস্তে আস্তে অনুভূমিক দিকে বাঁ থেকে ডানে সরতে সরতে পর্দার প্রান্তে পৌঁছে এক লাফে বাঁয়ে প্রাথমিক সরণ-বিন্দুতে ফিরে এসে আবার আগের মতোই ধীরে ধীরে ডানে সরতে থাকে এবং সেই প্রান্তে পৌঁছেই আবার চট্‌ ক'রে বাঁয়ে ফিরে আসে—এইভাবেই বারবার ঘটনাক্রম আবৃত্ত হয় এবং স্পন্দনের কাল-সরণ-রেখা আঁকা হতে থাকে। প্রযুক্ত বিভবভেদের কম্পাংক নিয়ন্ত্রণ ক'রে ইলেকট্রন-কিরণের এই শ্লথন দোলন-কাল, আপতিত শব্দের মূল সুরের পর্যায়কালের সমান করা সম্ভব; তখন দোলন-লিখের পর্দায় শব্দতরঙ্গের রূপরেখা একেবারে স্থির হয়ে দাঁড়িয়ে যায়। পর্দার ওপরে আলোক-সচেতন ফিল্‌ম রাখলে তরঙ্গরূপটি সরাসরিভাবে মুদ্রিত হয়।

ইলেকট্রন প্রায় ভরহীন ব'লে এই মুদ্রণে যান্ত্রিক সাড়ায় বিকৃতি বা কালবিলম্ব ঘটার কোন সম্ভাবনা নেই। মুদ্রকের নিজস্ব অনুনাদের প্রশ্নও এখানে ওঠে না। সর্বনিম্ন থেকে সম্ভবপর সর্বোচ্চ ($\simeq 10^8$ চক্র) কম্পাংক পর্যন্ত এই দোলন-লিখ সমভাবে সুগ্রাহী। মাইক্রোফোন এবং অ্যাম্‌প্লিফায়ারের কৃতি দিয়েই দোলন-লিখের প্রতিবেদনের চরম কম্পাংক-সীমা নিয়ন্ত্রিত হয়, তার নিজস্ব কোন ঊর্ধ্বসীমা নেই।

নিম্ন কম্পাংকে (1000 থেকে 3500 চক্র) দোল-কুণ্ডলী গ্যাল্‌ভ্যানো-মিটারের নীতিতে সক্রিয় **ডাডেল** এবং **এইনথোভেন** উদ্ভাবিত দোলন-লিখও উল্লেখযোগ্য। জোরালো অরীয় চৌম্বকক্ষেত্রে প্রথম যন্ত্রে দুই ভিন্ন ধাতুর তৈরী লুপ আকারের দ্বিপাত এবং দ্বিতীয় যন্ত্রে ধাতুপ্রলেপযুক্ত খুব সরু কোয়াৎ'জের সূত্র থাকে; তাদের মধ্যে দিয়ে মাইক্রোফোন-জাত প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা গেলে তাদের দোলন হতে থাকে। ছোট্ট একটি আয়না থেকে প্রতিফলিত আলোককিরণ এক সচল আলোক-সচেতন ফিল্‌মে এই দোলনরেখা মুদ্রিত করে। তীব্র শব্দ ছাড়া এদের কাজ ভালো হয় না।

খ. মিলার-উদ্ভাবিত ফনোডাইক : নামার্থ—শব্দ-দেখানোর যন্ত্র। এই যন্ত্রে শব্দস্পন্দিত ছদের কম্পন আলোকরশ্মির সাহায্যে পর্দায় ফেলে দেখানো যায় কিম্বা আলোক-সচেতন ফিল্‌মে ফেলে কাল-সরণ-রেখা মুদ্রিত করা যায়। 16.4 চিত্রে এই যন্ত্রে গৃহীত সাধারণ দুটি বাঁশী-জাতীয় বাদ্যযন্ত্রের স্পন্দনের রূপরেখা দেখানো হয়েছে।

16.5 চিত্রে ফনোডাইক যন্ত্রের রেখাচিত্র দেখানো হয়েছে। একটি সূচক-শিঙার (H) ছোট মুখটি মাত্র 0.0076 সেমি বেধের কাচপাত (D) দিয়ে বন্ধ ; D-এর মধ্যবিন্দু থেকে খুব সরু ও হাল্‌কা একটি প্ল্যাটিনাম তার বা সিল্কের সুতো P পুলির গায়ে মাত্র এক পাক ঘুরে Sp স্প্রিং-এ আট্‌কানো থাকে। পুলির অক্ষদণ্ডে একটি 1 মিমি বর্গ, 0.002 গ্রাম ওজনের একটি ছোট্ট আয়না (M) লাগানো ; S উৎস থেকে আসা সমান্তরাল কিরণ প্রতিফলিত ক'রে সে অংশাংকিত কাগজ বা ফিল্‌মে (F) ফেলে।

চিত্র 16.4—ফনোডাইক-শাব্দলেখ

চিত্র 16.5—ফনোডাইক

আপতিত শব্দতরঙ্গের চাপভেদের ক্রিয়ায় কাচের পাতটি কাঁপতে থাকে ; ফলে আট্‌কানো তারে একবার ঢিল পড়ে, পরক্ষণেই টান পড়ে। তাতে P এবং তার অক্ষবর্তী আয়নার কৌণিক স্পন্দন হতে থাকে ; ফলে F-এর ওপর উৎস-প্রতিবিম্বের ডাইনে-বাঁয়ে দোলন হয়। F-এর ওপরে আলোক-সচেতন ফিল্‌মটি সমবেগে ($\simeq$40 ফি/সে) ওপরে উঠে যেতে থাকায় তার ওপরে D-র স্পন্দনের অর্থাৎ শাব্দতরঙ্গের রূপরেখা মুদ্রিত হয়ে যায়। এই মুদ্রণ (যেমন, চিত্র 16.4) প্রায় $2\frac{1}{2}''$ প্রস্থ জুড়ে এবং 40 হাজার গুণ বিবর্ধিত

হয়ে থাকে। সঙ্গে সঙ্গে একটি অবিচল আলোকরশ্মি এই স্পন্দনরেখার অক্ষ হিসাবে দাগ ফেলে যেতে থাকে; আবার একটি বিদ্যুৎ-ধারা উদ্দীপিত সুরশলাকা থেকে প্রতিফলিত সবিরাম আলোকছটা (flash) এই অক্ষের ওপর কালাংকন ক'রে যায় (16.4 চিত্রে স্পন্দন-অক্ষ বা কালাংকন কোনটিই দেখানো হয়নি)।

M থেকে প্রতিফলিত স্পন্দনরেখা স্বচ্ছ আলোক-সচেতন ফিল্‌মের মধ্যে দিয়ে পাঠিয়ে কাগজের ওপর দরকারমতো সাইজে ফেলে পেন্সিল দিয়ে আঁকা যায়; ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখে পাওয়া মুদ্রণ থেকেও অনুরূপভাবে কাগজে চিত্র আঁকা সম্ভব। এই চিত্রই পরে যন্ত্রে বিশ্লেষিত হয়।

যেকোন ছদ-সংগ্রাহকের মতোই ফনোডাইকের সাড়া সমগ্র কম্পাংকপাল্লায় সমান থাকা সম্ভব নয়। ছদ এবং শিঙা দুয়েরই অনুনাদী কম্পাংকে সাড়া অতিরঞ্জিত হওয়ার সম্ভাবনা থাকে। ছদের কম্পাংক যথাসম্ভব বাড়িয়ে ($>10kHz/s$), তার দরুন অনুনাদ-বিকৃতি এড়ানো যায় বটে, কিন্তু শিঙার সম্পর্কে সেরকম ব্যবস্থা করা যায় না, আর শিঙা বাদ দিয়ে সাধারণ তীব্রতার শব্দমুদ্রণ অসম্ভব। তাই মিলার গোটা কম্পাংকপাল্লা জুড়ে সমপ্রাবল্যের শব্দের সাহায্যে তাঁর যন্ত্রের ক্রমাংকন-রেখা (অনেকগুলি অনুনাদ-শীর্ষযুক্ত) স্থির করেন (১৯০৯); এজন্যে তিনি ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকের 61টি অর্গান-নল স্বনক হিসাবে ব্যবহার করেন এবং দক্ষ সঙ্গীতজ্ঞেরা এদের সমান প্রাবল্য বিচার করেন; বলা বাহুল্য, এই বিচার নৈর্ব্যক্তিক (objective) না হওয়ায় ক্রমাংকন-রেখার মূল্য কিছুটা অনিশ্চিত।

অ্যাণ্ডারসন শিঙা এবং টানের স্প্রিং দুইই বাদ দিয়ে উন্নততর সংস্করণ (১৯২৫) উদ্ভাবন করেছেন; ফলে কেবল ছদের অনুনাদের সম্ভাবনা থেকে গেছে; আর বিদ্যুৎ-লালিত সুরশলা দিয়ে 128 থেকে 8200 ~ পর্যন্ত ক্রমাংকন করা সম্ভব হয়েছে।

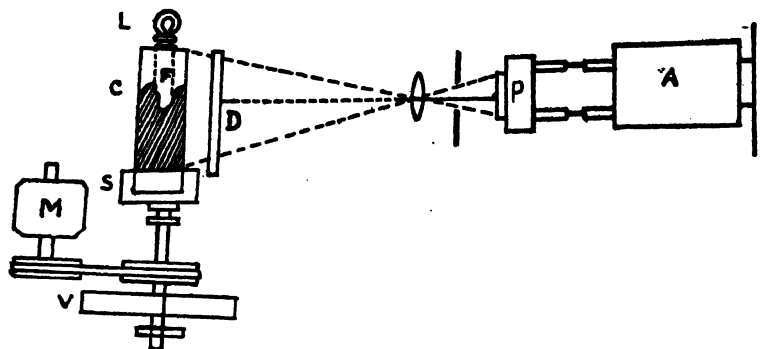
গ. স্বয়ংশব্দলিখ (Phonoautograph and Phonograph): স্কটের উদ্ভাবিত **ফোনো-অটোগ্রাফ** (১৮৫৯) যান্ত্রিক পন্থায় শব্দমুদ্রণের আদিম ব্যবস্থা। এই যন্ত্রে (চিত্র 18.1) একটি শিঙার ছোট মুখটি উপবৃত্তাকার, সেটি পাতলা রবারের ছদ দিয়ে বন্ধ; সমকোণে বাঁকানো একটি লেভারের হ্রস্বদৈর্ঘ্য বাহুর সূচীমুখ এই ছদকে ছুঁয়ে থাকে আর লেভারের দীর্ঘতর বাহুর প্রান্তে থাকে একটি লেখনী—সে হাতে-ঘোরানো এক বেলনের গায়ে কাগজের ওপর স্পন্দনশীল ছদের কাল-সরণ-রেখা আঁকে। প্রায় বিশ

বছর পরে এডিসনের ফোনোগ্রাফ যন্ত্রে (১৮৭৭) এর কিছু কিছু উন্নতি হয় ; তিনি লেখনী দিয়ে মোম-মাখানো এবং ঘড়ির কলকব্জায় (clockwork) ঘোরানো ড্রামের ওপর শাব্দচাপ অনুসারী পরিবর্তী গভীরতার নালী কাটার ব্যবস্থা করলেন ; তারপর এই বেলনের নালী এবং আর একটি ভূষা-মাখানো ড্রামের মধ্যে লম্বা সূচীমুখ লেভার ঠেকিয়ে রেখে দুটোকে চালু করলেই ছদের স্পন্দনরেখা লেখা হয়ে যায়। দুই যন্ত্রেই মুদ্রণে বহু ত্রুটি থাকা স্বাভাবিক, এবং ছিলও। এদের কার্যনীতির ভিত্তিতে বার্লিনার গ্রামোফোনের আবিষ্কার করেন (১৮৮৭)। এইভাবেই শব্দসংরক্ষণ এবং পুনর্নাদের প্রথম পদক্ষেপ ঘটে। এদের সম্বন্ধে ১৮-১ অনুচ্ছেদে পুনরালোচনা হবে।

১৬-৫. মুদ্রিত স্পন্দনরেখার বিশ্লেষণ :

ওপরে শব্দের তরঙ্গরেখা-মুদ্রণের নানা উপায়ের কথা বলা হ'ল ; এবারে তাদের (যথা, চিত্র 16.4) বিশ্লেষণ করতে হলে ফুরিয়ার-আঙ্গিকগুলি জানা চাই এবং সেজন্যে লৈখিক বা যান্ত্রিক ব্যবস্থা দরকার। ১০-১২ অনুচ্ছেদে লেখচিত্র থেকে অংক কষে অপেক্ষাকৃত সরল স্পন্দনগুলির সম্ভবপর ফুরিয়ার-বিশ্লেষ্যগুলি বার করা হয়েছে। অধিকাংশ পরীক্ষাধীন তরঙ্গরেখাই অনেক বেশী জটিল ; তাদের বেলায় এইভাবে এগোনো অনেক বেশী সময়সাপেক্ষ এবং শ্রমসাধ্য কাজ। এই কাজ সংক্ষেপ করতে কেলভিন, হেন্‌রিসি, মাইকেলসন, স্ট্র্যাটন প্রমুখ বিজ্ঞানীরা নানা ধরনের **যান্ত্রিক দোলন-বিশ্লেষক** (harmonic analyser) যন্ত্র উদ্‌ভাবন করেছেন। তারা যান্ত্রিকভাবেই প্রয়োজনীয় সমাকলনগুলি ক'রে দেয়। বিশ্লেষ্য স্পন্দনরেখাটিকে দরকারমতো মাপে এঁকে নিয়ে যন্ত্রের পাদপীঠে রেখে যন্ত্রের সূচকটিকে সেই রেখার ওপর দিয়ে বোলানো হয় ; তখন প্রথম কয়েকটি ফুরিয়ার-সহগ অর্থাৎ সেই সেই স্পন্দনবিস্তারের মাপগুলি সরাসরিই মেলে ; খুব বেশীসংখ্যক সহগগুলি জানার দরকার হয় না।

আলোক-সচেতন বিশ্লেষক (চিত্র 16.6) : 3″ বা 4″ চওড়া একটি আলোক-সচেতন ফিল্‌ম্ কাচের তৈরী C বেলনের ওপর এমনভাবে জড়ানো হয় যে, তার আদি এবং অন্ত প্রান্ত-দুটি ঠিক একই রেখা বরাবর শেষ হয়। ফিল্‌ম্ F-এর ওপর তরঙ্গরেখা মুদ্রিত থাকে ; তার একপাশ কালো, অপর পাশ স্বচ্ছ। বেলনের অক্ষ বরাবর বিশেষ এক ধরনের বৈদ্যুতিক বাতির (L) জ্বলন্ত সূত্রটি (filament) থাকে। মোটরের (M) সাহায্যে C-কে দরকারমতো নিয়ত কৌণিক বেগে ঘোরানো যায় ; তার সামনে দীর্ঘ রন্ধ্র D

এবং আলোকসচেতন কোষ (photo-cell) P ; আলোক-কিরণ তরঙ্গরেখা বরাবর রন্ধ্র অতিক্রম ক'রে ফোটো-সেলের ওপরে সরু একটি প্রতিবিম্ব ফেলে। বেলনটি ঘুরতে থাকলে প্রতিবিম্বের উজ্জ্বলতা কমতে বাড়তে থাকে এবং কোষে সমলয়ে বিদ্যুৎধারা উৎপন্ন হতে থাকে এবং সেই প্রবাহ 50 চক্র/সে

চিত্র 16.6—আলোক-সচেতন স্পন্দন-বিশ্লেষক

কম্পাংকের একটি স্পন্দনী গ্যালভ্যানোমিটারে যায় ; গ্যালভ্যানোমিটার স্পন্দন-বিশ্লেষকের কাজ করে। বেলনের ঘূর্ণনবেগ আস্তে আস্তে বাড়াতে থাকলে যখনই তরঙ্গের কোন অঙ্গস্পন্দনের চরমমান বা শীর্ষ, 50 চক্র/সে কৌণিক বেগে রন্ধ্র পার হয়ে আসবে তখনই গ্যালভ্যানোমিটার সাড়া দেবে এবং বেলনের সেই কৌণিক বেগই ঐ আঙ্গিকের স্পন্দনাংক ($2\pi n$) হবে। কাজেই বেলনের যে যে কৌণিক বেগে গ্যালভ্যানোমিটারের সাড়া পাওয়া যাবে সেই সেই কম্পাংকের অঙ্গসুর বিশ্লেষ্য শব্দতরঙ্গে থাকবে। তা ছাড়া সাড়ার মান আলোক-তড়িৎ-ধারার সমানুপাতিক ব'লে অঙ্গসুরের স্পন্দনবিস্তারও এখানে মাপা সম্ভব।

F ফিল্মের ওপরে যে পন্থায় তরঙ্গরেখা মুদ্রিত করা হয় তাকে পরিবর্তী ঘনত্ব (variable density) মুদ্রণ (§ ১৮.৫খ) রীতি বলে। এর মধ্যে দিয়ে আলোককিরণ পাঠালে ঘনত্ব অনুযায়ী আলোকতীব্রতা নিয়ন্ত্রিত হয় এবং পরিবর্তী তীব্রতার কিরণ আলোক-সচেতন কোষে প'ড়ে পরিবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা উৎপন্ন করে।

১৬-৬. মুদ্রণ ব্যতিরেকে শব্দতরঙ্গের বিশ্লেষণ :

শব্দতরঙ্গ মুদ্রিত না ক'রেও তাকে সরাসরি বিশ্লেষণ ক'রে কি কি সুর তাতে আছে তা নির্ধারণ করা যায়। আমাদের কান, হেল্‌মহোল্‌ৎজ অনুনাদক,

তপ্ত-তার মাইক্রোফোন প্রভৃতি যন্ত্রগুলি বায়ুবাহিত শব্দতরঙ্গমালা বিশ্লেষণ করতে পারে ; তা ছাড়া আলোকবর্ণালী-বিশ্লেষণের সবচেয়ে শক্তিশালী হাতিয়ার ঝর্ঝর (grating) যন্ত্রটির নীতিতে তৈরী **শাব্দ ঝর্ঝর-ব্যবস্থা** শাব্দবর্ণালী-বিশ্লেষণ অর্থাৎ প্রদত্ত তরঙ্গের অঙ্গসুরসন্ধানে ব্যবহৃত হয়েছে। বর্তমানে সুরবিশ্লেষণের উন্নততম ব্যবস্থা ইলেকট্রনীয় **হেটেরোডাইন বিশ্লেষক।**

ক. কানে সুর-বিশ্লেষণ ঃ স্পন্দনবিশ্লেষণের সম্ভবপর বহু পন্থা আছে ; ফুরিয়ার-উপপাদ্য তাদের মধ্যে একটি মাত্র ; তার অবশ্য বিশেষ আবেদন ও গুরুত্বের কারণ যে, আমাদের কানে মিশ্র শব্দের বিশ্লেষণ এইভাবেই হয়।

বিজ্ঞানী ওহ্‌ম প্রথম নির্দেশ করেন (১৮৪৩) যে, সরল দোলনের আর বিশ্লেষণ সম্ভব নয় এবং তারাই কানে বিশুদ্ধ বা সরল সুরের অনুভূতি জাগায় (§ ১৭-৫)। অন্য যেকোন পর্যাবৃত্তজাতীয় শব্দতরঙ্গই কানে বিশ্লেষিত হয়ে আঙ্গিক সুরগুলি নির্ণীত হয়। এই বিশ্লেষণ আমরা সচেতনভাবে করি না, সুরেলা শব্দের জটিল গঠনও আমরা লক্ষ্য করি না ; কিন্তু একটু মনোযোগ দিলেই এই গঠন সম্বন্ধে অবহিত হতে পারি।

কানে মিশ্র শব্দ পৌঁছলে তার মূল সুর সহজেই ধরা যায়, আর একটু অভ্যাস করলে সমমেলগুলিও শোনা যায় ; অভ্যাসবলে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ ষোড়শ সমমেল পর্যন্ত শুনতে পেতেন। মূল এবং সমমেলগুলির প্রত্যেকটিই সরল সুর এবং তারা গ্রাহক-যন্ত্রে সরল দোলন উৎপন্ন করে। আবার যন্ত্র- বা কণ্ঠসঙ্গীতে সুরের মেলার মধ্যে, শ্রবণরত কান মোট সুরানুভূতির বাইরে গায়কের বা যেকোন যন্ত্রের ওপর, এমন-কি এদের বাইরেও, মনোনিবেশ করতে এবং সজাগ থাকতে পারে। কানের এই বিশ্লেষণক্ষমতা কিন্তু অনন্য।

খ. অনুনাদকে বিশ্লেষণ ঃ অনুনাদ ঘটিয়ে যেকোন মিশ্র শব্দতরঙ্গে ফুরিয়ার-বিশ্লেষ্যের উপস্থিতি টের পাওয়া যায়। বায়ুগহ্বরে বা মেলবন্ধ পত্রীশ্রেণীতে অনুনাদ ঘটানো হয়। প্রথম-জাতীয় বিশ্লেষক হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ অনুনাদক (§ ৮-৫) এবং তপ্ত-তার মাইক্রোফোন (§ ১৫-৯খ)।

আমরা আগেই দেখেছি যে (§ ১৪-১২), গহ্বরস্থ বায়ুর স্পন্দনে অবদমন সামান্য হওয়ায় এবং তীক্ষ্ণ মেলবন্ধ (sharp tuning) থাকায় স্থির কম্পাংকের কোন সুরের ক্ষেত্রে **হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ অনুনাদক** অত্যন্ত সুবেদী সন্ধানীর কাজ করে। জটিল শব্দের বর্ণালী বিশ্লেষণে অর্থাৎ অন্তর্ভুক্ত

ভিন্ন ভিন্ন সুরের সন্ধানে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ ক্রমপরিবর্তী আয়তন এবং কণ্ঠপ্রস্থের অনুনাদক শ্রেণী ব্যবহার করেন। তিনি অনুনাদকের কণ্ঠ স্বনকমুখী ক'রে বসিয়ে অন্য ফুটোটির কাছে কান পেতে বা ফুটোটিকে রবার-নলের সাহায্যে কানের সঙ্গে যোগ ক'রে নিয়ে সুর শোনেন। আগন্তুক শব্দতরঙ্গে অনুনাদকের সমকম্পাংকের সুর থাকলে তীক্ষ্ণ মেলবন্ধনের দরুন তার জোরালো বিবর্ধন ঘটবে আর উপস্থিত অন্য সুরগুলি বিশেষভাবে অবদমিত হবে ; ভিন্ন ভিন্ন অনুনাদকে ভিন্ন ভিন্ন সুরে সাড়া পাওয়া যাবে। কাজেই মিশ্র সুরের ঠিকমতো বিশ্লেষণ করতে অনেকগুলি অনুনাদক দরকার। এই অসুবিধা দূর করতে ক্যোনিগ এই অনুনাদকের সংশোধন করেন। তিনি একটি চওড়া বায়ুনলের মধ্যে একটি সামান্য সরু আর-একটি নল (চিত্র $14.16b$) সমাক্ষভাবে যাতায়াত করার ব্যবস্থা করেন—এতে অনুনাদকের বায়ুস্তম্ভের দৈর্ঘ্য তথা কম্পাংক ইচ্ছামতো বদলানো সম্ভব হয়। এইরকম দুটি পরিবর্তী অনুনাদক একটি মাত্র কণ্ঠ দিয়ে যুক্ত হলে ($16.14c$ ছবি দেখ) যন্ত্রের সুগ্রাহিতা অনেকগুণ বাড়ে, বিশেষত ছবির ডান দিকেরটি যদি আয়তনে অনেক বড় হয়।

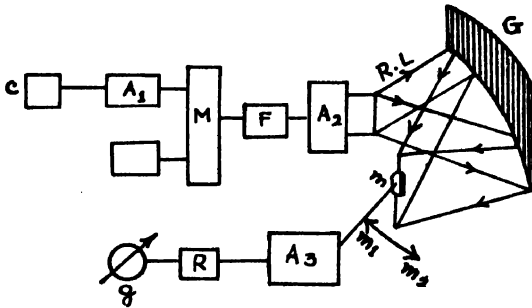
বায়ুগহ্বরের অনুনাদ চাক্ষুষ করার ব্যবস্থাও করা হয়েছে। হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদক-শ্রেণীর প্রতিটির কণ্ঠে সমকম্পাংকের পাতলা পত্রী বসানো থাকে ; পত্রীশীর্ষে একটুকরো অভ্র একটি বাতি-স্কেল ব্যবস্থার আয়নার কাজ করে এবং একই দীপক থেকে আলো ভিন্ন ভিন্ন পত্রী থেকে প্রতিফলিত ক'রে একই স্কেলে ফেলা যায়। অনুনাদ ঘটলে, স্কেলে আলোকবিন্দুর জোরালো স্পন্দন তা ইঙ্গিত করে। দুইদফা অনুনাদের ব্যবস্থা থাকায় মেলবন্ধন খুবই খর হয়। এই সাড়া কিন্তু, খালি অনুনাদকের মূল কম্পাংকেই মেলে।

তপ্ত-তার মাইক্রোফোন তো আসলে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-অনুনাদকই। সুতরাং সুরবিশ্লেষণে এই যন্ত্রটির বহুল ব্যবহার। এর বাড়তি সুবিধা যে, হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ অনুনাদকে অঙ্গসুরগুলির আপেক্ষিক তীব্রতার কোন ধারণাই পাওয়া যায় না, কিন্তু এখানে তারও একটা আন্দাজ মেলে।

একসারি **মেলবন্ধ পত্রীস্পন্দকের** সাহায্যেও অনুনাদ-সন্ধান ও সুরবিশ্লেষণ সম্ভব। ক্রমবর্ধমান দৈর্ঘ্যের একসারি পত্রীর প্রতিটির মাথায় ছোট্ট অবতল আয়না থেকে একই দীপকের আলো প্রতিফলিত ক'রে একটি সরু রন্ধ্রের প্রতিবিম্বের আকারে একই স্কেলের ওপর আলোক-সচেতন ফিল্‌মে ফেলার ব্যবস্থা থাকে। এই পত্রীগুলি একটিমাত্র বিদ্যুৎ-চুম্বক দিয়ে উদ্দীপিত। বিশ্লেষ্য শব্দতরঙ্গ মাইক্রোফোনে গৃহীত হয় এবং তাতে উৎপন্ন প্রত্যাবর্তী

বিদ্যুৎ-ধারাই এই চুম্বককে সক্রিয় করে। তখন পত্রীগুলির পরবশ কম্পন হয়ে স্কেলের ওপর রন্ধ্র-প্রতিকৃতি কাঁপতে সুরু করে ; আপতিত শব্দে যে যে কম্পাংকের সুর থাকে সেই সেই কম্পাংকের মেলবন্ধ পত্রীগুলি আঙ্গিক বিদ্যুৎ-ধারাগুলির ক্রিয়ায় সবিস্তারে কাঁপে। সুতরাং সেই সেই পত্রীগুলির জানা কম্পাংক থেকে অঙ্গসুরগুলির কম্পাংক এবং ফিল্মে মুদ্রিত স্পন্দনবিস্তার থেকে তাদের আপেক্ষিক তীব্রতা, দুইই পাওয়া যায়।

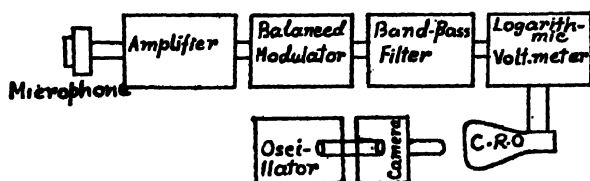
গ. শাব্দ-ঝর্ঝর (Acoustic Grating): শব্দতরঙ্গের বিবর্তন-ধর্মের আলোচনায় (§ ৯-৮) এই যন্ত্রটির উল্লেখ করা হয়েছে। আলোক-বর্ণালী-বিশ্লেষণে এর গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা লক্ষ্য ক'রে বিজ্ঞানীরা একে প্রয়োজনমতো সংস্কার ক'রে নিয়ে শাব্দবর্ণালী-বিশ্লেষণে (অর্থাৎ মিশ্র স্বরে ভিন্ন ভিন্ন সুরসন্ধানে) প্রয়োগ করেছেন।

বিজ্ঞানী মেয়ার একটি বেলনতলের আকারে 1 সেমি ব্যবধানে 3.4 মিমি ব্যাসের কয়েকটি লোহার সূচী পরপর দাঁড় করিয়ে 3 মি দীর্ঘ অবতল শাব্দ-ঝর্ঝর G (চিত্র 16.7) তৈরি করেছেন। ছবিটিতে গোটা বিশ্লেষণ-ব্যবস্থাটি চিত্রিত হয়েছে। বিশ্লেষ্য শব্দতরঙ্গ একটি ধারক মাইক্রোফোনে (C) প'ড়ে তদনুযায়ী পর্যাবৃত্ত বিদ্যুৎ-ধারা উৎপন্ন করে। ভাল্‌ভ-সম্প্রসারক (A) এই বিদ্যুৎ-ধারাকে বিবর্ধিত ক'রে একটি ভেদক বা মডিউলেটরে (M) পাঠায়।

চিত্র 16.7—শাব্দ-ঝর্ঝর (Acoustic Grating)

এই যন্ত্রটিতে সেই বর্ধিত পর্যাবৃত্ত ধারার ওপর 45 কিলোহার্ৎজ কম্পাংকের এক প্রত্যাবর্তী বাহক (carrier)-ধারা আরোপ করলে দুই ধারার উপরিপাতনে অন্তর- এবং যোগ-স্বন কম্পাংকের পর্যাবৃত্ত ধারা উৎপন্ন হয়। বৈদ্যুতিক ফিল্‌টারের (F) সাহায্যে উচ্চতর কম্পাংকের ধারা ছেঁকে বের ক'রে নিয়ে দ্বিতীয়

সম্প্রসারকে (A_2) বিবর্ধনের পরে রিবন-জাতীয় লাউড-স্পীকারে (RL) সরবরাহ করা হয়; RL থেকে বিকিরিত শব্দতরঙ্গ মোটামুটি বেলনীয়। তারা G থেকে বিবর্তিত হয়ে কম্পাংক বা তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনুসারে বিভিন্ন অভিমুখে যায়। আর একটি ধারক মাইক্রোফোন (m) স্থান-বদল ($m_1 \rightarrow m_2$) ক'রে ক'রে বর্ণালী-বীক্ষণের দূরবীনের মতো তাদের সন্ধান ক'রে বেড়ায়। বিবর্তিত শব্দতরঙ্গ-শ্রেণী m-এ যে যে প্রত্যাবর্তী ধারা জাগায় তাদের তৃতীয় একটি সম্প্রসারকে (A_3) বিবর্ধিত ক'রে শোধক-যন্ত্রের (Rectifier, R) সাহায্যে একটি দিষ্ট ধারায় ($d.c.$) রূপান্তরিত করা হয়। এই ধারা g গ্যাল্‌ভানোমিটারে যতগুলি এবং যতখানি বিক্ষেপ ঘটায়, ততগুলি এবং ততখানি বিস্তারের অঙ্গস্বর প্রাথমিক শব্দে ছিল। এইভাবেই অঙ্গস্বরশ্রেণীর সংখ্যা, কম্পাংক এবং বিস্তার দ্রুতগতিতে মাপা সম্ভব হয়েছে।

ঘ. **Heterodyne বিশ্লেষক** (চিত্র 16.8): শাব্দ-ঝর্ঝরের মতো এই যন্ত্রেও, বিশ্লেষ্য শব্দতরঙ্গজাত পর্যাবৃত্ত বিদ্যুৎ-ধারার সঙ্গে নিয়ন্ত্রণাধীন কম্পাংকের এক বিশুদ্ধ প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা মিশিয়ে নিয়ে, যুক্তস্বন-কম্পাংকের ধারা উৎপন্ন ক'রে তারই বিশ্লেষণ করা হয়।

বিশ্লেষ্য শব্দতরঙ্গ ধারক মাইক্রোফোনে পর্যাবৃত্ত বিদ্যুৎ-ধারা উৎপন্ন করে; সেই বিদ্যুৎ-ধারা একটি প্রতিমিত (balanced) ভেদকে যায় এবং একটি ভাল্‌ভ্‌-চালিত স্পন্দকে উৎপন্ন বিশুদ্ধ কম্পাংকের আর-একটি প্রত্যাবর্তী ধারার সঙ্গে মেশে; দ্বিতীয় ধারার কম্পাংক বিস্তীর্ণ পাল্লার মধ্যে বদল করা যায়। এই দুই প্রবাহের সংযোগে নানা যোগ-কম্পাংকের উৎপত্তি সম্ভব। কিন্তু মডিউলেটরে উৎপন্ন যুক্ত কম্পাংকে, আপতিত শব্দ-কম্পাংক এবং আরোপিত ধারা-কম্পাংকের যোগ- এবং অন্তর-কম্পাংকের দুই সংকীর্ণ পাল্লা ছাড়া, আর

চিত্র 16.8—Heterodyne Analyser

কোন কম্পাংক থাকতে পারে না। এই অনুমোদিত পাল্লার কম্পাংকশ্রেণীই একটা শাব্দ-ফিল্‌টার থেকে বেরিয়ে আসে। ধরা যাক, 10 থেকে 5000

চক্র/সে কম্পাংকের শব্দ-বিশ্লেষণ করতে হবে ; তা হলে স্পন্দকযন্ত্র থেকে আগন্তুক-ধারা 11 থেকে 16 কিলোহাৎ´জ/সে পর্যন্ত আস্তে আস্তে বদ্‌লানো হয়, আর 11 কিলোহাৎ´জের কাছাকাছি সংকীর্ণ পাল্লার একটি শাব্দ-ফিল্‌টার ব্যবহার করা হয় ; সেক্ষেত্রে শব্দতরঙ্গে যে যে কম্পাংক থাকবে তার প্রতিটিই বাহক স্পন্দন-কম্পাকের সঙ্গে মিলে, 11 কিলোচক্রের এক একটি অন্তর-কম্পাংকের ধারা শাব্দ-ফিল্‌টার থেকে বেরোবে। এইভাবেই মিশ্র শব্দের অন্তর্গত প্রতিটি সুরই শাব্দ-ফিল্‌টার থেকে একে একে নির্দেশিত হবে।

এখানে **শাব্দ-ফিল্‌টারটি** চৌম্বক-তাতি (§ ২০-৩)-ধর্ম-উদ্দীপিত মোনেল ধাতুর রড্ ; রড্‌টি মধ্যবিন্দুতে আধৃত আর তার দুইপ্রান্তে দুটি তড়িৎ-কুণ্ডলী জড়ানো। কুণ্ডলী-দুটির মধ্য দিয়ে বিপরীতমুখী প্রবাহ চালিয়ে রড্‌টিকে চুম্বকিত করা হয়। তারপর তাদের একটি কুণ্ডলীর মধ্যে এমন প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা পাঠানো হয়, যার কম্পাংক রডের অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের মূল কম্পাংকের সমান ; ফলে রড্‌টি, অনুনাদী স্পন্দনাংকে দৈর্ঘ্যে কমা-বাড়া ক'রে শাব্দতরঙ্গ উৎপন্ন করতে থাকে ; অনুনাদ অত্যন্ত খর হওয়ায় শব্দতরঙ্গের কম্পাংক খুবই সংকীর্ণ পাল্লার মধ্যে থাকে। একটি ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখের সঙ্গে শাব্দ-ফিল্‌টার যুক্ত ; তার আলোকগ্রাহী পর্দার ওপর সূচক আলোকবিন্দুটি অনুভূমিক অক্ষ-বরাবর সরতে থাকে ; সেই সরণ অঙ্গসুরের কম্পাংকের লগারিদ্‌মের আনুপাতিক, আর সেই সুরটির বিস্তারমান পর্দার ওপর খাড়া দিকে মুদ্রিত হতে থাকে। কোন মিশ্র স্বর একই সঙ্গে কানে শোনা আর বিশ্লেষিত সুরগুলির রূপরেখা চোখে দেখতে, শাব্দ-প্রিজম্ ব্যবস্থার সঙ্গে দোলন-লিখ্-ব্যবস্থা যুক্ত করা যায়। তখন বাহক-কম্পাংক দ্রুতগতিতে এবং বারংবারই, নির্দিষ্ট কম্পাংকপাল্লার মধ্যে বদ্‌লানো হতে থাকে আর সূচক আলোকবিন্দু কম্পাংকের অনুপাতে অনুভূমিক অক্ষ-বরাবর সরতে থাকে।

প্রসঙ্গক্রমে বলা যায় যে, পতঙ্গজগতে ঝিঁঝি বা পঙ্গপাল পরস্পরের মধ্যে যোগাযোগ রাখতে 8 কিলোচক্রের বাহক-কম্পাংকের ওপর 300 চক্রের অন্তর-স্বন সৃষ্টি ক'রে থাকে। স্বরবিশ্লেষণ করতে এরা ফুরিয়ার-বিশ্লেষণ করে না, তারা দ্রুত স্বরকম্প বা কম্পাংকের দ্রুত ভেদন কাজে লাগায়।

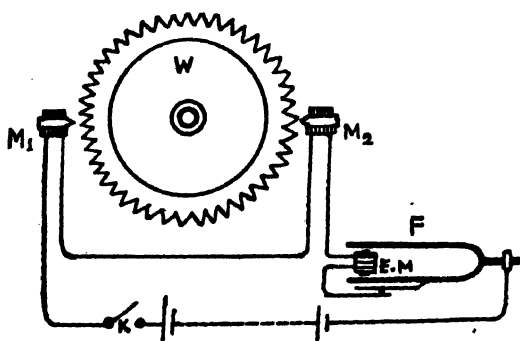
১৬-৭. কম্পাংক ও তার পরিমাপ :

সুরেলা শব্দের সর্বপ্রধান বৈশিষ্ট্য নির্দিষ্ট তীক্ষ্ণতা ; এই অনুভূতি প্রায় সম্পূর্ণভাবে নির্ভর করে সুরের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের ওপর, আর এই তরঙ্গদৈর্ঘ্য স্বনকের

কম্পাংক-নিয়ন্ত্রিত। কম্পাংকের পরিমাপ সুরবৈশিষ্ট্য-বিশ্লেষণের অন্যতম অঙ্গ। তুলনায় এই মাপন সহজ ব'লে এর বহু পদ্ধতি প্রচলিত। তাদের মোটামুটিভাবে দুটি শ্রেণীতে ভাগ করা যায়—(১) প্রত্যক্ষ পদ্ধতি, (২) পরোক্ষ পদ্ধতি। প্রথমটিতে সরাসরিভাবে স্বনকের কম্পন-সংখ্যা গোনা হয়, আর দ্বিতীয়তে কোন মানক উৎসের সঙ্গে পরীক্ষণীয় স্বনকের কম্পাংক তুলনা করা হয়। আমরা এখানে স্বনক বলতে সুরশলাকাই বুঝব। তার কম্পাংক-নির্ণয়ে সূক্ষ্মতা অর্জন করতে সুরশলাকার কম্পন দীর্ঘস্থায়ী হওয়া চাই—তাই বিদ্যুৎ-স্পন্দিত সুরশলাকা ছাড়া কাজ চলে না।

প্রত্যক্ষ শ্রেণীর মধ্যে র‍্যালে-শাব্দচক্র, দৃক্‌ভ্রম (stroboscope)-ব্যবস্থা ও লেখচিত্র-পদ্ধতি—এই তিনটি, আর পরোক্ষ শ্রেণীতে অনুনাদ-স্বরকম্প এবং লিসাজু-লেখ এই তিন রকমের কম্পাংক-মাপের প্রণালী আমরা আলোচনা ক'রবো। সবক্ষেত্রেই মুখ্যত সুরশলাকার কম্পাংক মাপার কথাই ব'লবো।

ক. সরাসরি স্পন্দনসংখ্যা-নির্ণয়ঃ

(১) র‍্যালে-উদ্ভাবিত শাব্দচক্র (Phonic wheel): যন্ত্রটি আধুনিক কালের সমলয় (isochronous) বৈদ্যুতিক ঘড়ির নীতিতে চলে। 16.9 চিত্রে W একটি কাঁচা-লোহার দন্তুর-চক্র; চক্রের দাঁতগুলি সমান্তর এবং চাকাটি অনুভূমিক অক্ষ-সাপেক্ষে ঘুরতে পারে। তার দাঁতগুলি এক বিদ্যুৎ-চুম্বকের দুই মেরু M_1, M_2-কে প্রায় স্পর্শ করে। পরীক্ষাধীন চুম্বকশলাকা এই বর্তনীর অন্তর্ভুক্ত এবং বর্তনীকে নিজ কম্পাংকে বিঘ্নিত করে।

চিত্র 16.9—র‍্যালে-র শাব্দচক্র

চাকাটিকে একবার ঘুরিয়ে দিলে, পরে সে বিদ্যুৎচুম্বকীয় বলের ক্রিয়ায় ঘুরতে থাকে। M_1 ও M_2 কাছের চক্রদন্ত আকর্ষণ ক'রে ঘূর্ণন বজায়

রাখার প্রয়াস পায়, ফলে অল্প সময়ের মধ্যেই চাকাটি সুষম বেগে ঘুরতে থাকে। সুরশলাকার স্পন্দনের পর্যায়কাল পরপর, বিদ্যুৎ-প্রবাহ বিঘ্নিত হতে থাকে; দুই ক্রমিক বিঘ্ন ঘটার অন্তর্বর্তী সময়ে M_1 বা M_2-এর সামনে থেকে যদি চাকার একটি দাঁত সরে গিয়ে ঠিক পরেরটি এসে হাজির হয় তাহলেই চাকার ঘূর্ণন সুষম হবে। এই অবস্থায় চাকা যদি সেকেণ্ডে m বার ঘোরে আর তার দন্তসংখ্যা যদি n হয়, তাহলে সুরশলাকার কম্পাংক mn হবে; দীর্ঘকাল সাইক্লোমিটার যন্ত্র দিয়ে পর্যবেক্ষণ ক'রে m নির্ভুলভাবে বার করা যায়। এই পদ্ধতিতে 10^4 ভাগে 1 ভাগ পর্যন্ত সূক্ষ্মতা অর্জন করা গেছে।

এই কম্পাংক-নির্ণয়ে র‍্যালে নিম্নলিখিত পদ্ধতি নিয়েছিলেন। 32-এর কাছাকাছি কম্পাংকের বিদ্যুৎ-চালিত সুরশলাকা দিয়ে তিনি চারটি আর্মেচার-যুক্ত একটি শাব্দচক্র ও 128-এর কাছাকাছি কম্পাংকের একটি সুরশলাকাকে চালাবার ব্যবস্থা করেন। চালক-সুরশলাকা থেকে বিঘ্নিত প্রবাহ দ্বিতীয় সুরশলাকার বিদ্যুৎ-চুম্বককে সক্রিয় করে; সুতরাং তার পরবশ কম্পনসংখ্যা প্রথমটির ঠিক চারগুণ (128-এর কাছাকাছি) হবে। শাব্দচক্রে চারটি আর্মেচার থাকায় তার ঘূর্ণনসংখ্যা চালক কম্পাংকের ঠিক এক-চতুর্থাংশ অর্থাৎ প্রায় 8 হবে। শাব্দচক্রে একটি ছিদ্র থাকে; তার মধ্যে দিয়ে চক্রের পেছনে একটি সেকেণ্ড-দোলকের ওপরে আলোকিত গুটি (bead) দেখা যায়। চক্রের ঘূর্ণনসংখ্যা সেকেণ্ডে ঠিক 8 হলে, এক সেকেণ্ডে ঠিক আটবার একই অবস্থানে গুটিটি দেখা যাবে; ঘূর্ণন যদি ঠিক 8 বার না হয়, তবে গুটির অবস্থানগুলি হয় আস্তে আস্তে এগোবে (ঘূর্ণন 8-এর বেশী হলে), না হয় আস্তে আস্তে পেছোবে। যদি এক সেকেণ্ডে একটি অবস্থান p বার পরেরটিতে পৌঁছয়, তাহলে এক সেকেণ্ডে চাকা, পেণ্ডুলামের দোলন থেকে p বার কম বা বেশীবার ঘুরবে। তাহলে এক সেকেণ্ডে

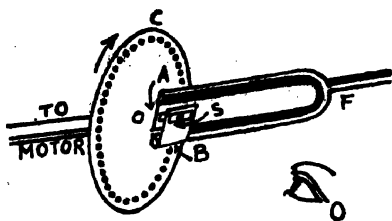
চাকার ঘূর্ণনসংখ্যা $= 8 \pm p$; চালক সুরশলাকার কম্পাংক $= 4(8 \pm p)$; চালিত কম্পাংক $= 16(8 \pm p)$ [চাকার ঘূর্ণন লালিত স্পন্দনের সামিল]

এইবার 128-এর কাছাকাছি নির্ণেয় কম্পাংকের সুরশলাকার সঙ্গে এই চালিত কম্পাংকের স্বরকম্প উৎপন্ন করা হয়; স্বরকম্পের সংখ্যা q হলে, নির্ণেয় কম্পাংক $= 16(8 \pm p) \pm q$

২. **ভ্রমিদৃক্ (Stroboscope) পন্থা:** এই ব্যবস্থায় দুই স্পন্দক বা ঘূর্ণকের মধ্যে আপেক্ষিক বেগের বিলোপ ঘটিয়ে এমন দৃক্-ভ্রম ঘটানো হয় যাতে সচল বস্তুকে অচল দেখায়; ওপরে, ঘুরন্ত চাকার ফুটোর মধ্যে

দিয়ে নিরীক্ষিত দোলককে স্থির দেখানোর ব্যবস্থা বর্ণনা করা হয়েছে। এই ব্যবস্থায় দোলকের আলোকিত গুটিটিকে নির্দিষ্ট সময় পরপর দেখা যায়; একে আমরা সবিরাম পর্যবেক্ষণ বলতে পারি। (১) দুই নিরীক্ষণের মধ্যে কালান্তর যদি স্পন্দকের (এক্ষেত্রে চাকার) পর্যায়কালের সমান হয়, তাহলে স্পন্দককে (এখানে গুটিটিকে) অনড় দেখায়। (২) আবার স্পন্দকে সবিরাম আলোকপাত করলে যদি আলোকপাতের অন্তরকাল তার পর্যায়কালের সমান হয়, তাহলেও স্পন্দককে অচল দেখাবে। এইভাবে আপাত দৃক্-ভ্রম ঘটিয়ে বিদ্যুৎ-স্পন্দিত সুরশলাকার কম্পাংক নির্ভুলভাবে বার করা সম্ভব।

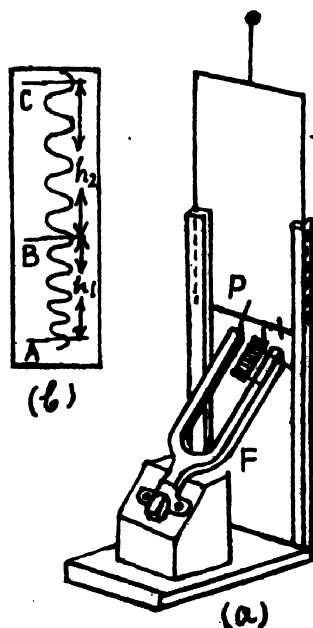
(১) **সবিরাম আলোকপাত:** এই পন্থায় সুরশলাকার বিদ্যুৎ-চালিত-চুম্বকটি একটি বৈদ্যুতিক আবেশকুণ্ডলীর মুখ্য বর্তনীতে থাকে; কুণ্ডলীর গৌণ বর্তনীতে থাকে বিদ্যুৎক্ষরণ-উদ্দীপিত ছোট একটি নিয়নবাতি। মুখ্য কুণ্ডলীতে প্রবাহ, সুরশলাকা নিজস্ব স্পন্দনকাল পরপর বিঘ্নিত করে; ফলে সেই সময় পরপর বিদ্যুতাবেশের দরুন নিয়নবাতিটি একবার ক'রে জ্বলে ওঠে এবং সুরশলাকার নির্দিষ্ট অংশবিশেষ আলোকিত হয়। নিয়নবাতি ব্যবহারের সুবিধা এই যে, যে ক্ষণকাল ধ'রে গৌণকুণ্ডলীতে বিভবভেদ থাকে ঠিক ততটুকু সময়ই সে জ্বলে। সুতরাং দীর্ঘকাল ধ'রে, নিয়নবাতির ক্ষণদীপন সংখ্যা গুনে গুনে সুরশলাকার কম্পাংক মাপা যায়।

(২) **সবিরাম নিরীক্ষণ:** 16.10 চিত্রে এই পন্থায় যন্ত্র-সজ্জা দেখানো হয়েছে; দীর্ঘবাহু সুরশলাকার (F) দুই বাহুতে খুব পাতলা দুই ধাতুপাত A এবং B; দুটিতেই মুখোমুখী দীর্ঘ রন্ধ্র S, তাদের মধ্য দিয়ে C চাকার সমকেন্দ্রিক ফুটোকির সারিগুলির একটিকে দেখা যায়। মোটরের সাহায্যে চাকাটিকে সুষমবেগে ঘোরানো যায়। তখন একের পর এক ফুট্‌কি দেখা যাবে। সুরশলাকা স্পন্দিত হলে, তার একবার স্পন্দনে S রন্ধ্রদ্বয় দু'বার সামনাসামনি আসবে এবং মাত্র তখনই চাকার ফুট্‌কি দেখা যাবে। চাকার বেগ বাড়িয়ে কমিয়ে, যদি তার একবার ঘূর্ণনের সমান সময়ে সুরশলাকার অর্ধকম্পন হয় তাহলে চাকার ফুট্‌কি অনড় দেখাবে। যদি সেকেণ্ডে ঘূর্ণনসংখ্যা q এবং ফুটোকির সংখ্যা p হয়, তাহলে কম্পনসংখ্যা $n = 2pq$ হবে।

চিত্র 16.10—স্ট্রোবোস্কোপ-ব্যবস্থা

A, B পাত-দুটি থাকায় সুরশলাকার কম্পাংক খানিকটা কমে যায়। এই ত্রুটি এড়াতে সুরশলাকার একটি বাহুর ওপর একটুখানি জায়গা পালিশ ক'রে খুব চক্‌চকে করা হয় এবং সেই অংশটিকে উজ্জ্বলভাবে আলোকিত করা হয়। এক দূরবীক্ষণ দিয়ে এই অংশটুকু নিরীক্ষণ করা হয় এবং দুয়ের মাঝে ঘূর্ণনশীল চাকাটি রাখা থাকে। চাকাতে ফুট্‌কির বদলে সমকেন্দ্রিক কয়েক সারি ফুটো থাকে। চাকার ঘূর্ণন-অক্ষে সাইক্রোমিটার যন্ত্র লাগিয়ে তার ঘূর্ণনবেগ নির্ণয় করা হয়। মোটরের ঘূর্ণনের সমতার ওপর কম্পাংক-মাপনের শুদ্ধতা নির্ভর করে। এই পরীক্ষায় 0.1% পর্যন্ত শুদ্ধতা অর্জন করা যায়।

বিকল্প পন্থায়, সাদা কার্ডবোর্ডে চাকার ওপর কালো রঙের কয়েক সারি সমকেন্দ্রিক ফুট্‌কি থাকে। তাকে এক বৈদ্যুতিক মোটর দিয়ে ঘোরানো হয়; এর বেগ ইচ্ছামতো কমানো-বাড়ানো যায়। কার্ডের ওপর ছোট্ট একটু জায়গায় সবিরাম দীপক থেকে আলো ফেলা হয়। সবিরাম দীপন এবং চাকার পর্যায়কাল সমান হলেই ফুট্‌কি স্থির দেখাবে। সবিরাম দীপকটি, বিদ্যুৎ-চালিত সুরশলাকা দিয়ে বিঘ্নিত-দীপন নিওন-বাতি। সুরশলাকার কম্পাংক $n = pq$; বিভিন্ন সারিতে ফুট্‌কির সংখ্যা আলাদা আলাদা হওয়ায়, নিরীক্ষিত সারি বদল ক'রে চাকার বেগ এবং সুরশলাকার কম্পনে সামঞ্জস্য আনা, আগের তুলনায় সহজ। আবার সুরশলাকার কম্পাংক জানা থাকলে ভ্রমিদৃক্‌ পদ্ধতিতে চাকার ঘূর্ণনবেগ সহজেই বেরোয়; সেটি বেগের নিমেষমান, গড় বেগ নয়।

চিত্র 16.11—পতনশীল পাত

৩. লেখচিত্র পদ্ধতি: অনেক কাল আগে ভুষা-মাখানো বেলনকে অনুভূমিক অক্ষসাপেক্ষে সুষম বেগে ঘুরিয়ে সরু, হালকা লেখনীযুক্ত স্পন্দনশীল সুরশলাকার স্পন্দনরেখা আঁকা হ'ত। নির্দিষ্ট কালে কতগুলি পূর্ণ তরঙ্গ লিপিবদ্ধ হয়েছে, তাই গুনে কম্পাংক বার করা হ'ত। যন্ত্রের নাম **ভাইব্রোস্কোপ,** উদ্ভাবকের নাম ডুহামেল।

তারপর ঐরকম স্পন্দনশীল সুরশলাকার লেখনী ছুঁয়ে একটি ভুষা-মাখানো কাচের প্লেট, অভিকর্ষের (g) ক্রিয়ায় নামানোর ব্যবস্থা [চিত্র 16.11(a)] হয় ; তখন প্লেটের গায়ে অভিকর্ষজ ত্বরণ এবং সুরশলাকার অনুভূমিক সুষম স্পন্দনের মিলিত কাল-সরণ-রেখা অঙ্কিত হয় [চিত্র 16.11(b)]। যদি h_1 এবং h_2 দৈর্ঘ্যের মধ্যে সমসংখ্যক (N) তরঙ্গ থাকে, তাহলে সুরশলাকার কম্পাংক হয়

$$n = N\sqrt{g/(h_2 - h_1)}$$

এখানে আবার n জানা থাকলে অভিকর্ষজ ত্বরণের মোটামুটি মান মেলে।

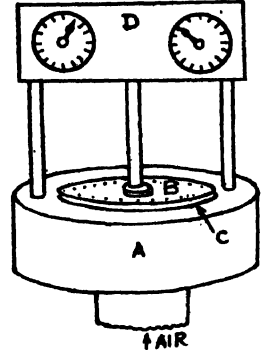
দুই পদ্ধতিতেই লেখনীর ভার, ঘর্ষণ এবং বেগ বা ত্বরণ অক্ষুণ্ণ রাখার অসুবিধা থাকায় পরীক্ষণে সূক্ষ্মতা বেশী হতে পারে না। তাই পরীক্ষাধীন সুরশলাকা এবং আর একটি মানক-সুরশলাকার পালিশ-করা জায়গা থেকে প্রতিফলিত আলো খাড়া দিকে সচল ফিল্‌মে ফেলে, পাশাপাশি দুটি কাল-সরণ-রেখা মুদ্রিত করা হয়। দুই অনুভূমিক সমান্তরাল রেখার মধ্যে মুদ্রিত পূর্ণ তরঙ্গের অনুপাতই দুই কম্পাংকের অনুপাতের সমান।

খ. তুলনামূলকভাবে সুরশলাকার কম্পাংক-নির্ণয় : জানা কম্পাংকের স্বনকের সঙ্গে পরীক্ষাধীন সুরশলাকার তীক্ষ্ণতা (pitch) তুলনা ক'রে তার কম্পাংক যথেষ্ট সূক্ষ্মতার সঙ্গে বার করা যায়। এখানে কানের অনুভূতি দিয়েই চূড়ান্ত বিচার হয়। সামান্য তীক্ষ্ণতাভেদও কান খুব সহজে ধরতে পারে এবং স্বরকম্প গুণে কম্পাংকভেদ বার করতে পারে। কম্পাংক-নির্ণয়ের সহজ পদ্ধতির প্রতিটিতেই স্বরকম্প গুনে বিচার করা হয়। আমরা তা ছাড়া, কোন জানা কম্পাংকের স্বনকের সঙ্গে অনুনাদ প্রতিষ্ঠা ক'রেও, সুরশলাকার কম্পাংক নির্ভুলভাবেই বার করতে পারি।

১. **স্বরকম্প-গণনা :** নির্ণেয় সুরশলাকার কম্পাংকের (n) কাছাকাছি কম্পাংকের (n_1) একটি সুরশলাকা বাজালে যদি স্বরকম্পের সংখ্যা p হয়, তাহলে $n = n_1 \pm p$; এবারে নির্ণেয় শলাকার এক বাহুর ওপর এক ফোঁটা মোম ফেললে p যদি বেড়ে যায়, তাহলে $n = n_1 + p$, আর p কমে গেলে, $n = n_1 - p$ হবে।

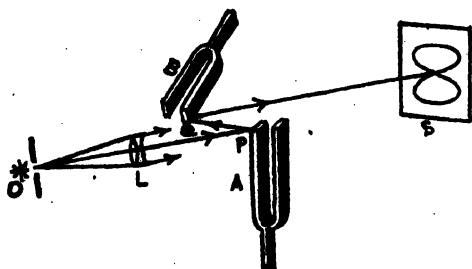
টোনোমিটার : এটি একটি মানক সুরশলাকা-শ্রেণীবিশেষ। এতে পরপর সুরশলাকার মধ্যে কম্পাংক-ভেদ 4 চক্র/সে, আর শেষেরটির কম্পাংক প্রথমটির দ্বিগুণ রাখা হয়। যেকোন অষ্টকে, প্রয়োজনীয়সংখ্যক সুরশলাকা নিয়ে শ্রেণীটি তৈরি হয়। নির্ণেয় সুরশলাকার সঙ্গে পরপর দুটি (কম ও বেশী)

শলাকার মধ্যে স্বরকম্প গুণে নির্ভুলভাবে যেকোন স্বনকের কম্পাংক নির্ণয় করা সম্ভব। পদ্ধতিটি কিন্তু নিঃসন্দেহে শ্রমসাধ্য ও ক্লান্তিকর।

ক্যাগনেয়ার দ লা তুর-এর সাইরেন : এই যন্ত্রে (চিত্র 16.12) স্তম্ভাকৃতি এক বায়ুকক্ষ দিয়ে (A) বায়ুস্রোত পাঠানো হয়। কক্ষের ছাদ C পাতটিতে, বৃত্তাকার সারিতে সমান্তর ছিদ্রমালা থাকে। তার ঠিক ওপরে এবং খুব কাছে অনুরূপ ছিদ্রযুক্ত আর একটি চাকা B; সেটিকে বৈদ্যুতিক মোটর দিয়ে সুষমবেগে খাড়া অক্ষ-সাপেক্ষে ঘোরানো হয়। B আর C-র ছিদ্রগুলি মুখোমুখী হলেই বায়ুর এক এক ঝাপ্টা বেরোয়। বিঘ্নিত বায়ুস্রোতের ঝাপ্টার সংখ্যা স্বনকম্পাংকে পৌঁছলে শব্দ হয়। এই শব্দ অবশ্যই বিশুদ্ধ সুর নয়; সুতরাং তুলনাকালে মূল সুর সন্ধান ক'রে নিতে হয়। B-র ঘূর্ণনবেগ বাড়িয়ে বাড়িয়ে যখন তার শব্দ, নির্ণেয় সুরের সঙ্গে সমতান হবে তখন সেই সুরের কম্পাংক $n=pq$ (ঘূর্ণনবেগ $\times$ ছিদ্রসংখ্যা)। বাস্তবে A-তে বায়ুচাপ আর B-র ঘূর্ণনসংখ্যা নিয়ন্ত্রিত ক'রে ধীর স্বরকম্প (r) প্রতিষ্ঠা করা হয়। তখন নির্ণেয় কম্পাংক $n=pq \pm r$ হয়। এর সাহায্যে যেকোন স্বনকেরই কম্পাংক নির্ণয় করা যায়। B-র ঘূর্ণন-অক্ষদণ্ডে স্ক্রু কাটা থাকে; তাতে গীয়ার-চাকা জুড়ে ঘূর্ণনসংখ্যা মাপার ব্যবস্থা (D) করা হয়।

চিত্র 16.12—সাইরেন

সাইরেন একটি সুপরিচিত জোরালো স্বনক; এই যন্ত্রটি স্থির বা পরিবর্তী প্রাবল্যের শব্দ সহজেই উৎপন্ন করতে পারে। তাই কলকারখানায় সময়-সংকেত, বিমান-আক্রমণের সংকেত কিম্বা কুয়াশায় সাবধানতা-সংকেত পাঠাতে এর ব্যবহার হয়। শব্দপ্রাবল্য আরও বাড়াতে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ দ্বি-সাইরেন উদ্ভাবন করেন; তাতে বায়ুকক্ষ দুটি।

২. **লেখচিত্র পদ্ধতি :** যদি নির্ণেয় কম্পাংকের সঙ্গে আর একটি জানা কম্পাংকের অনুপাত দুই ক্ষুদ্র অখণ্ড-সংখ্যার অনুপাতের সমান হয়, তাহলে লিসাজু-চিত্রের গড়ন দেখে সেই মান বার করা যায়। 16.13 চিত্রে A এবং B দুই বিদ্যুৎ-চালিত সুরশলাকা; A-র বাহুদ্বয় খাড়া, B-র অনুভূমিক। P এবং Q জায়গা-দুটি খুব ভালো ক'রে পালিশ-করা, তারা

আয়নার কাজ করে। L লেন্স্, উজ্জ্বল দীপক (O) থেকে আলো, পরপর P এবং Q-এর ওপর ফেলে। প্রতিফলিত আলো S পর্দায় পড়ে। সুরশলাকা দুটি স্পন্দিত হতে থাকলে পর্দায় লব্ধি-সরণ অনুযায়ী বক্র আঁকা হতে থাকে ; তার আকার, A এবং B-র কম্পাংক আর তাদের স্পন্দনের মধ্যে আদি দশাভেদের ওপর নির্ভর করে। 10.15 চিত্রটি দেখ। দৃষ্টিনির্বন্ধের (persistence of vision) কারণে অঙ্কিত বক্রটিকে একটানাই দেখায়। ছবিতে প্রদর্শিত সুরশলাকাটির একটি অন্যটির এক অষ্টক উর্ধ্বে এবং আদিতে সমদশায় ছিল (চিত্র 10.11a দেখ)। চিত্রে অংকিত বক্র থেকে কম্পাংকের অনুপাত (চিত্র 10.13) আন্দাজ করা যায়।

চিত্র 16.13—লিসাজু-চিত্র থেকে কম্পাংক-নির্ণয়

যদি দুই কম্পাংকে সামান্য তফাৎ থাকে তাহলে বক্রের আকার ক্রমাগত বদ্‌লাতে থাকে এবং যে সময় (t) পরে, একটি আর-একটির চেয়ে একবার বেশী কাঁপে সেই সময়ে দুয়ের কম্পাংকের মধ্যে সম্পর্ক দাঁড়ায়

$$nt = n't + 1 \quad \text{বা} \quad n/n' = 1 + (1/n't)$$

n' জানা থাকলে, n নির্ভুলভাবে বার করা যায়। উচ্চ-কম্প্যাংকে লিসাজু-চিত্র নিরীক্ষণ করতে ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখ অপ্রতিদ্বন্দ্বী যন্ত্র।

৩. **অনুনাদ পদ্ধতি :** পরীক্ষাগারে সনোমিটারে স-টান তারের সঙ্গে কিম্বা অনুনাদী নলে বদ্ধ বায়ুস্তম্ভের সঙ্গে অনুনাদ-প্রতিষ্ঠা, সুরশলাকার কম্পাংক-নির্ণয়ের বহুল-ব্যবহৃত সহজ পন্থা। স-টান তারের মূলকম্পাংক $n = (\sqrt{T/m})/2l$; স্পন্দনশীল সুরশলাকা সনোমিটার-বাক্সের ওপর বসিয়ে তারের স্পন্দনী দৈর্ঘ্য নিয়ন্ত্রণ ক'রে অনুনাদ প্রতিষ্ঠা করা হয়। তখন দুই কম্পাংক সমান। সমতান না হলে স্বরকম্প গুণেও কম্পাংক বার করা যায়। যত্ন করলে এই পরীক্ষায় 0.5% পর্যন্ত শুদ্ধি অর্জন করা সম্ভব। অনুনাদী নলে বায়ুস্তম্ভের দৈর্ঘ্য বদ্‌লে-বদ্‌লে সুরশলাকার সঙ্গে অনুনাদ প্রতিষ্ঠা করলে $n = c/4(l + 0.3d)$ হবে। এই পরীক্ষা সহজ খুবই, কিন্তু অনুনাদ-বিচারে যথেষ্ট অনিশ্চয়তা থাকায় সূক্ষ্মতা উল্লেখযোগ্য নয়।

১৬-৮. শাব্দ তীব্রতা :

শাব্দ তীব্রতা বলতে একক-ক্ষেত্র ভেদ ক'রে লম্বভাবে স্পন্দনশক্তির স্থানান্তর যাওয়ার সময়-হার বা শাব্দ ক্ষমতা বোঝায়। ৬-৬.২ এবং ৭-১৪.৩ সমীকরণ থেকে যথাক্রমে সমতলীয় এবং গোলীয় তরঙ্গে শাব্দ তীব্রতা পেয়েছি

$$I = p_m^2/2\rho_0 c \quad (১৬-৮.১ক)$$

তা ছাড়া ৬-৬.৩ এবং ৬-৬.৫ থেকে তীব্রতার বিকল্প রূপ হিসাবে পাচ্ছি

$$I = 2\pi^2 n^2 \xi_m^2 \rho_0 c \quad (১৬-৮.১খ)$$

$$\text{এবং} \quad I = p_{rms} \times v_{rms} = \tfrac{1}{2} c \rho_0 v_m^2 \quad (১৬-৮.১গ)$$

অর্থাৎ তীব্রতা (১) মাধ্যমে কণার সরণবিস্তার বা বেগবিস্তারের, আর (২) মাধ্যমে শাব্দ চাপবিস্তার, মাধ্যমের অবিক্ষুব্ধ ঘনত্ব (ρ_0) এবং তরঙ্গবেগের (c) ওপর নির্ভর করে। শাব্দ তীব্রতা মাপতে ভিন্ন ভিন্ন প্রণালীতে সরণবিস্তার, বেগবিস্তার এবং চাপবিস্তার মাপা হয়েছে।

শাব্দ তীব্রতার নিয়ন্ত্রক : ক. বিস্তার (p_m, ξ_m, v_m) : মাধ্যমের কোন বিন্দুতে শাব্দ তীব্রতা বলতে সেখানে শক্তিপ্রবাহের হার বোঝায় ; স্বনকের তীব্রতা বলতে তার শক্তি-বিকিরণের হার বোঝায়। সুতরাং কোন স্পন্দকে যতবেশী শক্তি গোড়ায় যোগান দেওয়া হবে, তা থেকে তত বেশী হারে শক্তি বিকিরিত হবে।

ওপরের সমীকরণগুলি থেকে দেখছি যে তীব্রতা, সরণ, বেগ বা চাপ-বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক। এর কারণ এই যে, তীব্রতা শক্তি-প্রবাহের হার ব'লে অদিশ্ রাশি, অথচ অন্যগুলির প্রতিটিই সদিশ্ ; যেহেতু যেকোন রাশিরই বর্গ ঐ রাশির চিহ্ন- বা দিক্-নিরপেক্ষ, তীব্রতা নিশ্চয়ই সরণ, বেগ বা চাপের বিস্তারের বর্গের সমানুপাতিক হবে।

খ. কম্পাংক (n) : স্বনক সেকেণ্ডে যত বেশী বার স্পন্দিত হবে তত বেশী হারে মাধ্যমে শক্তি সঞ্চারিত হবে ; তা ছাড়া এই শক্তিসংযোজনও স্পন্দনের দিক্-নিরপেক্ষ। তাই তীব্রতা কম্পাংকেরও বর্গানুপাতী। ১৬-৮.১খ সমীকরণ আমাদের সেই তথ্যই দিচ্ছে।

গ. শব্দবেগ (c) এবং মাধ্যম-ঘনত্ব (ρ) : মোটামুটিভাবে এই দুটি রাশি পরস্পর নির্ভরশীল। শীতকালে বায়ুমাধ্যমে ঘনত্ব বেশী, তাই শব্দ বেশী জোর এবং বেশী দূর পর্যন্ত শোনা যায়। জলের ঘনত্ব বায়ু থেকে অনেক

বেশী ; সেখানেও এই ঘটনা ঘটে। ওপরের সমীকরণগুলিতে এই সম্পর্ক পরিস্ফুট।

ঘ. স্বনক থেকে দূরত্ব (r) : স্বনক থেকে মাধ্যমে শাব্দ-শক্তি সাধারণত গোলীয় তরঙ্গের আকারে ছড়িয়ে পড়বে। ৭-১২.২ সমীকরণ থেকে দেখছি যে, নিমেষ-শাব্দচাপ দূরত্বের ব্যস্তানুপাতে বদ্‌লায় ; ১৬-৮.১(ক) থেকে তাহলে বলতে পারি যে তীব্রতা ($kp_m{}^2$) দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতে বদ্‌লাবে। ৭-১২.৩ সমীকরণ থেকে দেখছি যে সরণবিস্তারও দূরত্বের ব্যস্তানুপাতে বদ্‌লায় ; তাই ১৬-৮.১খ অনুসারে তীব্রতা দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হয়।

সরাসরি বলা যায় যে, স্বনক থেকে r দূরত্বে গোলীয় তরঙ্গে শক্তি-ঘনত্ব $E/4\pi r^2$ এবং R দূরত্বে $E/4\pi R^2$ হবে। সুতরাং

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{E/4\pi r^2}{E/4\pi R^2}=\frac{R^2}{r^2} \text{ অর্থাৎ } I \propto 1/r^2 \qquad (১৬\text{-}৮.২)$$

ঙ. স্বনকের আয়তন ও পরবশ কম্পন : স্বনক যত বড় হবে তত বেশী পরিমাণ বায়ু আন্দোলিত হবে, অর্থাৎ তত বেশী পরিমাণ শক্তি মাধ্যমে সঞ্চালিত হবে—কাজেই তীব্রতা বাড়বে।

পরবশ কম্পন এবং অনুনাদের সাহায্যে একটি ছোট স্বনক বিস্তৃত কোন তল বা আয়তনকে স্পন্দিত করতে পারে। তাতে তীব্রতা বাড়ে।

১৬-৯. তীব্রতার পরিমাপ : সাধারণ আলোচনা :

শাব্দক্ষেত্রের কোন বিন্দুতে, শাব্দতীব্রতা বা শক্তিস্রোতের হার মাপাই পরীক্ষা-নিরীক্ষার দিক দিয়ে সবচেয়ে কঠিন। আমরা দেখলাম, তীব্রতা যেকোন বিস্তারের (সরণ, বেগ বা চাপ) বর্গের আনুপাতিক। তীব্রতা মাপার ক্ষেত্রে ব্যবহারিক অসুবিধা অনেকগুলি—

(১) শাব্দক্ষেত্রে গ্রাহক-যন্ত্র বসালেই সেখানে এবং আশেপাশে শক্তিপ্রবাহ কাজেই তীব্রতা বদ্‌লে যাবেই।

(২) পরিমেয় রাশিটি অর্থাৎ শক্তিপ্রবাহের হার খুবই কম—বেশ জোরালো শব্দেই 10^{-6} ওয়াট/সেমি^{2} মাত্র।

(৩) কোন শব্দসন্ধানী যন্ত্রই সব তীব্রতা বা কম্পাংককে সমভাবে সাড়া দেয় না ; এক এক শ্রেণী এক এক পাল্লায় সক্রিয়।

(৪) কোন যন্ত্র আবার তার নির্ধারিত তীব্রতা বা কম্পাংক-পাল্লার সর্বত্রও সমান দক্ষতায় সাড়া দেয় না।

(৫) একই যন্ত্র একই পাল্লায় মাধ্যমভেদে নিষ্ক্রিয় হয়ে যেতে পারে।

(৬) পরিমেয় তীব্রতা শব্দসন্ধানী যন্ত্রের স্পন্দনীর নিজস্ব কম্পনাংকে হলে, অনুনাদের দরুন সাড়া অল্পাধিকতর অতিরঞ্জিত হয়ে যাওয়ার সম্ভাবনা থাকে।

এদের মধ্যে **প্রথম অসুবিধাটিই** সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ। এটিকে দূর করতে গ্রাহক-যন্ত্রটির আকার বা সংস্থান (mounting) এমন হওয়া চাই যাতে শক্তির বিবর্তন বা বিক্ষেপণ নগণ্য মাত্র হয়। তা ছাড়াও গ্রাহক শক্তিপ্রবাহের পথে বাধা হয়ে থাকায় তার কাছাকাছি বায়ুর চাপ-আয়তনভেদের কার্যকরী সম্পর্কই বদ্‌লে গিয়ে তীব্রতার মান পাল্‌টে দিতে পারে। এই ত্রুটি দূর করতে দু'ভাবে চেষ্টা করা হয়েছে—(১) গ্রাহক-যন্ত্রের মাপ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় খুব ছোট ক'রে; তাতে বিবর্তন বা বিক্ষেপণজনিত শক্তির অপচয় বা বিকৃতি নগণ্য হয়। যেমন, স্যাসেরডোট-এর তৈরী ধারক-মাইক্রোফোনের অ্যালুমিনিয়ম স্পন্দক-ঝিল্লীর ব্যাস মাত্র 0.1 সেমি আর বেধ 0.001 সেমি, অর্থাৎ সেটি খুবই হাল্‌কা ও ছোট্ট। (২) ব্যালেণ্টাইন-এর উদ্ভাবিত গ্রাহক আকারে বড় কিন্তু একটি নিরেট গোলকের অঙ্গীভূত, কেননা গোলকের সামনে ও পেছনে বিবর্তন, তীব্রতাকে কতটা প্রভাবিত করে, র‍্যালে-র গণনা অনুসারে তার সঠিক হিসাব করা যায়।

দ্বিতীয় অসুবিধা দূর করতে যন্ত্র সূক্ষ্ম ও সংবেদনশীল করতে হয়। পরের অসুবিধাগুলি দূর করতে পাল্লা ও মাধ্যম ভেদে যথাযোগ্য যন্ত্রনির্মাণের কৌশল উদ্ভাবন করতে হয়েছে। **শেষটি** নিরসন করতে স্পন্দনী এমন টানে রাখা হয় যাতে তার স্বভাবী কম্পাংক পরিমেয় শব্দের কম্পাংকের ধারে-কাছেও না থাকে। বোঝাই যায় যে, পালনীয় সব সর্ত পূরণ ক'রে তীব্রতার **পরম মাপন** জটিল, দুরূহ কাজ। তীব্রতার এবং কম্পাংকের ভিন্ন ভিন্ন পাল্লায় সুষম সাড়া বা প্রতিবেদন পেতে নানা শ্রেণীর গ্রাহক এবং মুদ্রক উদ্ভাবিত হয়েছে। তীব্রতা মাপার বা তুলনা করার কয়েকটি মাত্র পদ্ধতি আমাদের আলোচনাভুক্ত হবে।

শাব্দক্ষেত্রে পরিবর্তী রাশিগুলির মধ্যে শাব্দচাপই সবচেয়ে সহজে মাপা যায়। তীব্রতা, তারই বিস্তারের বর্গের অনুপাতী। তা ছাড়া মাধ্যমের ঘনত্ব,

কণাগুলির সরণ বা বেগও পরিবর্তী রাশি এবং তাদের বিস্তার থেকেও তীব্রতা মাপা সম্ভব। এ-ছাড়াও শব্দতরঙ্গের বিকিরণ-চাপ এবং শাব্দচাপের ক্রিয়ায় বিচলিত ছদের সরণকে চলবৈদ্যুতিক বলের সাহায্যে প্রশমিত ক'রেও শাব্দতীব্রতা মাপা হয়েছে।

১৬-১০. মাইক্রোফোনের ক্রমাংকন : চাপ-বিস্তারের পরম মাপন :

১৬-৮.১(ক) সমীকরণে শাব্দক্ষেত্রের যেকোন বিন্দুতে শাব্দচাপবিস্তার (p_m) এবং তীব্রতার মধ্যে সম্পর্ক যে $I = p^2{}_m/2\rho_0 c$, তা দেখানো হয়েছে। আধুনিক ব্যবস্থায় এই সূত্র প্রয়োগ ক'রে চাপক্রিয় মাইক্রোফোন ক্রমাঙ্কিত ক'রে নিয়ে তার সাহায্যে শাব্দক্ষেত্রের যেকোন বিন্দুতে তীব্রতা মাপা হচ্ছে। মাইক্রোফোন-ক্রমাংকনের বহু পদ্ধতি চালু আছে; তাদের মধ্যে আমরা (ক) থার্মোফোন, (খ) পিস্টন-ফোন, (গ) স্থিরবিদ্যুৎ-সক্রিয়ক (actuator) এবং (ঘ) র‍্যালে-চক্রের ব্যবহার-পদ্ধতি আলোচনা ক'রবো।

ক. **থার্মোফোন** যন্ত্র ১৫-৪ক অনুচ্ছেদে বর্ণিত হয়েছে। 60 চক্র থেকে 120 কিলোচক্র/সে পাল্লায় এটি মাইক্রোফোন-ক্রমাংকনের কাজে ব্যবহৃত হয়েছে। একটি রুদ্ধপ্রায় বায়ুগহ্বরের ভেতরে থার্মোফোন বসিয়ে, তার মুখে ধারক-মাইক্রোফোনটি রাখা হয়। থার্মোফোনের তারে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা আশেপাশের বায়ুতে দ্বিগুণ কম্পাংকের উষ্ণতা-সৃষ্ট সংকোচন-তরঙ্গের সৃষ্টি করে। এই তরঙ্গের চাপ-বিস্তার দিয়েই মাইক্রোফোনের ক্রমাংকন করা হয়।

খ. কম্পাংক 60-এর নিচে থাকলে ক্রমাংকনের কাজে **পিস্টন-ফোনের** ব্যবহার হয়। একটি নলের এক মুখে মাইক্রোফোনের ঝিল্লীটি থাকে, অপর মুখে থাকে একটি হাল্কা পিস্টন; পিস্টনটি এক লাউড-স্পীকারের চলকুণ্ডলী-চালিত হয়ে নলের মধ্যে আনাগোনা করতে পারে। আলোকরশ্মির সাহায্যে পিস্টনের সরণবিস্তার মেপে নিয়ে শাব্দচাপবিস্তার বার করা হয়; তার সঙ্গে মাইক্রোফোনে উদ্ভূত বিভবভেদ তুলনা ক'রে ক্রমাংকন-সম্পর্ক প্রতিষ্ঠা করা হয়। অবস্বন-কম্পাংক 10 চক্র/সে থেকে সুরু ক'রে স্বনকম্পাংক 200 চক্র/সে পাল্লায় শাব্দতীব্রতার ক্রমাংকনে এই যন্ত্র ব্যবহার করা হয়েছে।

গ. **স্থিরবৈদ্যুতিক সক্রিয়ক যন্ত্রে** ধারক-মাইক্রোফোনের ঝিল্লী থেকে d দূরত্বে খাঁজ-কাটা একটি স্থির পাত রাখা থাকে। ঝিল্লী ও পাতের মধ্যে উচ্চ স্থিরমান বিভবভেদ (V_1) প্রয়োগ করা হয়। এদের ওপর শাব্দ-

তরঙ্গ পড়লে প্রত্যাবর্তী শাব্দচাপ এবং বিভবভেদ উৎপন্ন হয়; তাদের *rms* মান যথাক্রমে p_{rms} এবং V_2 হলে,

$$p_{rms}=V_1V_2/4\pi d^2 \quad \text{এবং} \quad p_m=\sqrt{2}\, p_{rms}$$

সূত্র থেকে শাব্দচাপবিস্তার নির্ণয় করা যায়। তাই দিয়ে মাইক্রোফোন ক্রমাংকিত করা হয়। উচ্চ, বিশেষত স্বনোত্তর কম্পাংকে এই ব্যবস্থা প্রযোজ্য।

ঘ. **র‍্যালে-চক্রের** সাহায্যে ক্রমাংকন পদ্ধতি আমরা ১৬-১২গ অনুচ্ছেদে আলোচনা ক'রবো। মাইক্রোফোনের সর্বাধুনিক এবং সূক্ষ্মতম ক্রমাংকন-ব্যবস্থা র‍্যালে-র তথাকথিত **ব্যতিহার তত্ত্বের** (reciprocity theorem) সাহায্যে করা হয়। এজন্যে লাগে একটি সুবেদী লাউড-স্পীকার এবং ছোট্ট একটি শক্তি-রূপান্তরক। মুক্ত তথা প্রতিধ্বনিরহিত শাব্দক্ষেত্র বা বদ্ধ তথা প্রতিধ্বনিত কক্ষে এই ক্রমাংকন করা হয়। পদার্থের শব্দশোষণ-গুণাংক মাপতে (§১১.৬খ) এইভাবে ক্রমাংকিত মাইক্রোফোন খুব কাজে লাগে।

অর্গান-নলে স্থাণুতরঙ্গজনিত চাপবিস্তারভেদ মাপতে ক্যোনিগ এবং রিচার্ডসন যথাক্রমে চাপমান-শিখা এবং চাপমান-কোষ ব্যবহার করেছেন। অর্গান-নলের গায়ে ছোট ছোট ছিদ্র ক'রে চাপমান-কোষ লাগানো হয়। আলোক-রশ্মির বিক্ষেপ থেকে ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে চাপবিস্তারের মান মেলে। ভিন্ন ভিন্ন উচ্চতার জলস্তম্ভের চাপ প্রয়োগ ক'রে আগেই কোষের চাপ-বিক্ষেপ ক্রমাংকন ক'রে নেওয়া থাকে। সরল হলেও এই পন্থায় সূক্ষ্ম মাপন অসম্ভব।

তীব্রতার পরম মাপের সরণ-প্রশমন (null) **পদ্ধতি**: চাপমান-মাইক্রোফোনের ছদ শাব্দচাপের ক্রিয়ায় স্পন্দিত হয়; তাতে অনুনাদ হয়ে সাড়া অতিরঞ্জিত হওয়ার সম্ভাবনা। এই ত্রুটি এড়াতে বিজ্ঞানী গেরল্যাক সেই ছদের ওপর বিপরীতমুখী প্রত্যাবর্তী বল প্রয়োগ ক'রে স্পন্দন-প্রশমনের ব্যবস্থা করেছেন। চলবৈদ্যুতিক স্পন্দন থেকে প্রশমনী বলের উৎপত্তি ঘটে। প্রযুক্ত প্রত্যাবর্তী প্রবাহ (i) এবং উদ্ভূত চৌম্বক আবেশের (B) মান থেকে প্রশমিত শাব্দচাপ তথা তীব্রতার মান পাওয়া যায়। বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় রাশিগুলির চরম মান সরাসরি মাপা যায়; তা ছাড়া সরণ মাপার প্রশ্ন থাকে না ব'লে এই পদ্ধতিতে শাব্দচাপের চরম মান পাওয়া সম্ভব।

পাতলা এবং চৌকা একটি অ্যালুমিনিয়ম পাতকে দু'দিকে শক্ত ক'রে আট্‌কে রেখে পাতের তল বরাবর স্থায়ী চুম্বকের সাহায্যে চৌম্বকক্ষেত্র প্রয়োগ করা হয়।

চৌম্বক বলরেখার আড়াআড়ি দিকে পাতের তল বরাবর সরল সমঞ্জস প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা পাঠানো হয়; তার বিস্তার, কম্পাংক, দশা সবই সূক্ষ্মনিয়ন্ত্রণাধীন। পাতটির মাঝের অংশেই চৌম্বকক্ষেত্র সুষম ব'লে ধরা যায়; সুতরাং বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় বলের ক্রিয়ায় এই অংশটুকুরই সরল দোলন সম্ভব এবং পরীক্ষাধীন সরল দোলীয় শব্দতরঙ্গ এখানেই ফেলা হয়। ছদের স্পন্দনজাত শব্দ শুনতে তার অন্যধারে স্টেথোস্কোপ বা শ্রবণ-নলের মুখ লাগানো থাকে। শব্দতরঙ্গ পড়তে দিয়ে ঝিল্লীর মধ্যে বিদ্যুৎ-প্রবাহের দশা ও কম্পাংক বদল ক'রে ক'রে তার স্পন্দন পূর্ণপ্রশমিত করা হয়। তখন আর শ্রবণ-নলে শব্দ শোনা যায় না।

এই অবস্থায় প্রবাহের নিমেষমান (i), চৌম্বক আবেশ (B) এবং বিদ্যুৎ-বাহী অংশের প্রস্থ (b) জানা থাকলে, একক বর্গক্ষেত্রে উদ্ভূত বলের মান (Bi/b) শাব্দচাপের সমান হয়; এখন B এবং b ব্যবহৃত যন্ত্রের ধ্রুবক, একেবারেই নির্ণেয় এবং অ্যামিটার থেকে প্রশমী প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারার rms মান পাওয়া সম্ভব। তাই গড় শাব্দচাপের তথা তীব্রতার মান এইভাবে সরাসরি পাওয়া যায়।

১৬-১১. শাব্দক্ষেত্রে কণার সরণবিস্তার থেকে তীব্রতা :

১৬-৮.১খ সমীকরণে শাব্দক্ষেত্রের কোন বিন্দুতে শাব্দতীব্রতা (I) এবং সরণ-বিস্তারের (ξ_m)-এর মধ্যে সম্পর্ক যে $I = 2\pi^2 n^2 \xi_m{}^2 \rho_0 c$ হয়, তা দেখানো হয়েছে। জোরালো শব্দে বায়ুস্তরের সরণ 0.001 সেমি পর্যন্ত হতে পারে এবং শক্তিশালী অণুবীক্ষণে তা মাপাও সম্ভব। আন্দ্রাদ এবং পার্কার এক-মুখ-বন্ধ নলে সরাসরি বায়ুস্তরের বিচলন মেপেছেন।

এক-মুখ-বন্ধ নলের খোলা মুখে একটি ছদের সরল দোলন ঘটিয়ে বায়ুস্তম্ভে অনুনাদী স্পন্দন উৎপন্ন করা হয়। বায়ুস্তরের স্পন্দনের নির্দেশক হিসাবে MgO ধোঁয়ার কণিকা ব্যবহার করা হয়েছে। নলে স্পন্দন না হলে কণিকা-গুলিকে অণুবীক্ষণের দৃশ্যপটে বিক্ষেপিত আলোয় উজ্জ্বল বিন্দুর মতো দেখায়। অনুনাদী স্পন্দন প্রতিষ্ঠিত হলে তাদের ছোট ছোট রেখার মতো দেখায়; পরীক্ষায় দেখা গেছে যে, কণার মাপ-নির্বিশেষে রেখাগুলি সমদৈর্ঘ্য হয়, অর্থাৎ তাদের দৈর্ঘ্য বায়ুকণাগুলির সরণের সমান। এই দৈর্ঘ্য মাপতে অণু-বীক্ষণের অভিনেত্রে একটি পাতলা কাঁচের পাত থাকে—তার ওপরে জানা তফাতে দুটি দাগ টানা। পাতটি ঘুরিয়ে ঘুরিয়ে রেখাটিকে দাগের মধ্যে

আনা হয়। এই সরণবিস্তার ξ_m, ঝিল্লীর কম্পাংক n, এবং নলের ব্যাসার্ধ r হলে, নলের খোলা মুখ থেকে অক্ষ বরাবর d দূরত্বে শক্তি-নির্গমের গড় হার অর্থাৎ তীব্রতার মান দাঁড়ায়

$$I = \frac{4\pi^4 n^4 r^4 \rho_0}{c\, d^2} \xi_m{}^2 = \tfrac{1}{4}\rho_0 \frac{\omega^4 r^4}{c\, d^2} \xi_m{}^2$$

এখানে ρ_0 বায়ুর স্থির অবস্থায় ভর-ঘনত্ব এবং c শব্দবেগ। শব্দ খুব জোর না হলে এই পদ্ধতি অচল। স্পষ্টতই ξ_m এখানে বায়ুকণার চরম স্পন্দনবিস্তার।

MgO কণার ব্যাস এত ছোট হয় যে, তাদের সবচেয়ে বড়গুলিও বায়ুকণাস্পন্দনে পূর্ণ অংশ নেয়; এদের ব্যাস ব্রাউনীয় গতি থেকে মাপা হয়। সতর্ক উষ্ণতা-নিয়ন্ত্রণ কণাগুলির পরিবহণ-গতি বন্ধ করে। একটি ভাল্‌ভ-সম্প্রসারকের সাহায্যে ছদের স্পন্দন ঘটানো হয়। ভাল্‌ভের কম্পাংক এবং বিকিরিত শব্দতরঙ্গ সম্পূর্ণ নিয়ন্ত্রণাধীন হওয়ায় ছদের তথা বায়ুস্তম্ভের কম্পাংক ও সরণবিস্তার অক্ষুণ্ন রাখা সহজেই সম্ভব।

১৬-১২. বেগবিস্তার থেকে শাব্দ তীব্রতা :

বায়ুমাধ্যমে শব্দতরঙ্গ চলাকালে বায়ুস্তরগুলি নির্দিষ্ট প্রত্যাবর্তী বেগে স্পন্দিত হতে থাকে। এই বেগের মান, একক ক্ষেত্র দিয়ে লম্বমুখে শক্তি-নির্গমনের সময়-হারের ওপর নির্ভরশীল ; অর্থাৎ বেগ মেপেও তীব্রতা মাপা সম্ভব। আমরা এই মাপনের দুটি পদ্ধতি আলোচনা ক'রবো।

১. তপ্ত-তারের দোলন : একমুখী বা প্রত্যাবর্তী বায়ুপ্রবাহে গরম তার রাখলে, তা ঠাণ্ডা হয়। তপ্ত-তার বায়ুতে স্পন্দিত হতে থাকার অর্থ তাকে প্রত্যাবর্তী বায়ুপ্রবাহের মধ্যে রাখা। রিচার্ডসন স্পন্দনশীল সুরশলাকার এক বাহুতে বৈদ্যুতিক তপ্ত-তার লাগিয়ে এই সিদ্ধান্তে পৌঁছান যে, প্রত্যাবর্তী বায়ুস্রোতের বেগ-বিস্তারে রাখলে এবং তারই সমান একমুখী বায়ুবেগে রাখলে, তারের উষ্ণতা-হ্রাস সমান হয়।

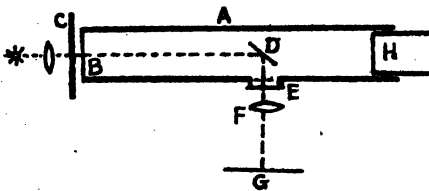
বাহুর সরণবিস্তার ξ_m হলে, তার প্রতিসম বাহুবেগবিস্তার $v_m = \omega\xi_m = 2\pi n\,\xi_m$ হবে। স্পন্দনশীল বাহু তথা তারকে ভিন্ন ভিন্ন সুষম বায়ুবেগে রেখে, তারের সরণ এবং প্রতিসম বাহুবেগের বিস্তারের মধ্যে সম্পর্ক ক্রমাংকিত ক'রে নেওয়া হয়। সুতরাং তারের যেকোন সরণবিস্তারে বায়ুকণার বেগবিস্তার বার ক'রে $I = \frac{1}{2}c\rho_0 v_m{}^2$ সূত্র প্রয়োগ ক'রে তা থেকে তীব্রতা নির্ণয় করা যায়।

তপ্ত-তার মাইক্রোফোনে এই নীতি প্রয়োগ ক'রে প্যারিস ও টাকার তীব্রতা-মাপনের সূক্ষ্মতা অনেক বাড়িয়েছেন। তাঁরা দুটি অনুনাদকের দুই কণ্ঠ যোগ ক'রে তার মাঝে তপ্ত তারটি রেখেছেন। ব্যবস্থাটি দ্বি-অনুনাদক র‍্যালে-চক্রের (চিত্র 16.14*c*) অনুরূপ।

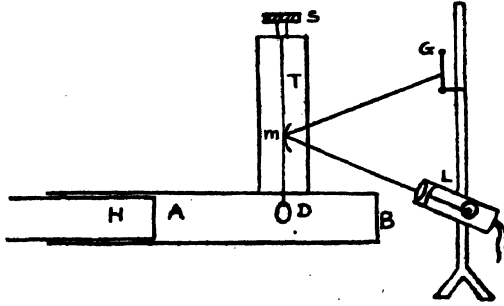
২. **র‍্যালে-চক্র :** র‍্যালে-র উদ্ভাবিত এই প্রণালীকে শাব্দ-তীব্রতা মাপার পরম প্রণালী ব'লে ধরা হয়। এই প্রণালীকে ভিত্তি ক'রে বহু তাত্ত্বিক পরীক্ষণ, নিরীক্ষণ, গবেষণা হয়েছে। এর কার্যকরী সূত্রের নানা তাত্ত্বিক সংশোধন ক্যোনিগ, কিং, অ্যাল্টবার্গ প্রমুখ বিজ্ঞানীরা করেছেন।

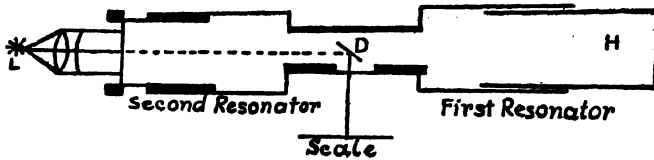
কার্যকরী সূত্র : চলপ্রবাহী-তত্ত্বানুসারে কোন প্রবাহীর পথে ছোট্ট, পাতলা, হাল্‌কা পাত বা চাক্‌তি রাখলে, তা স্রোতের অনুপ্রস্থে থাকতে চায়। স্রোত একমুখী হলে পাতের কৌণিক বিক্ষেপ বেগমানের সমানুপাতী, আর প্রত্যাবর্তী হলে সেই বিক্ষেপ গড় বর্গ বেগমানের সমানুপাতিক। ক্যোনিগ-এর মতে, *rms* স্রোতোবেগ (v) এবং উদ্ভূত বিক্ষেপী দ্বন্দ্বের (G) মধ্যে সম্পর্ক

$$G=\tfrac{4}{3}\rho r^3 v^2 \sin 2\theta \qquad (১৬-১২.১)$$

এখানে r চক্রব্যাসার্ধ এবং θ চক্রের ওপর স্রোতের আপতন-কোণ। চরমবেদিতা পেতে হলে চক্রটিকে বায়ুস্রোতের 45° কোণে রাখতে হয়। তখন $G=kv^2$, ভেদ-ধ্রুবক $k=\tfrac{4}{3}\rho r^3$। আনুষঙ্গিক পরীক্ষায়, ভিন্ন ভিন্ন জানা বায়ুস্রোতোবেগ প্রয়োগ ক'রে k-র মান বার করা হয়। এখন $I=\rho_0 c v^2$ হওয়ায় তীব্রতা সহজেই বার করা যাবে।

চিত্র 16.14(*a*)—র‍্যালে-চক্র (plan)

যন্ত্র-বর্ণনা (চিত্র 16.14) : বর্তমানে ব্যবহৃত যন্ত্র র‍্যালে-র ব্যবহৃত যন্ত্রের উন্নততর ব্যবস্থা—(*a*) চিত্রে যন্ত্রের শীর্ষচিত্র বা plan এবং (*b*) চিত্রে তার পার্শ্বচিত্র বা elevation দেখানো হয়েছে। *A* প্রায় 1″ ব্যাসের লম্বা একটি কাচ-নল। তার মাঝামাঝি কোয়াৎ‍র্জ-সূত্র (*T*) দিয়ে এক সেমি ব্যাসার্ধের এক অভ্রচক্র (*D*) ঝোলানো। চক্রের ব্যাসার্ধ নলের অর্ধেক হলে, কাজ সবচেয়ে ভালো হয়। সাম্য অবস্থায় চক্রটি নলের অক্ষের 45° কোণে থাকে; ক্ষুদ্র

(S) সাহায্যে তাকে ঘোরানো যায়। নলের এক-মুখ কাচের পাত (B) দিয়ে বন্ধ; তার সামনেই C একটি দীর্ঘ রন্ধ্র, তার মধ্য দিয়ে গিয়ে আলো D চক্রে প্রতিফলিত হয়ে F লেন্সের সাহায্যে G স্কেলের ওপর সংহৃত হয়। বিকল্পে, আলো T-র গায়ে ছোট্ট অবতল আয়না (m) থেকে প্রতিফলিত

চিত্র 16.14(b)—র‍্যালে-চক্র (elevation)

হয়। H একটি হাল্‌কা কাগজের পর্দা বা ঝিল্লী; তার মধ্য দিয়ে শব্দতরঙ্গ যেতে পারে এবং তাকে ইচ্ছামতো নড়ানো যায়। D-র বিক্ষেপ G স্কেল থেকে মাপা যায়। BH দৈর্ঘ্য বদ্‌লে-বদ্‌লে যখন অনুনাদ সৃষ্টি করা হয় তখন $BH = 3\lambda/4$ এবং $BD = \lambda/4$ এবং D চাপস্পন্দনবিন্দুতে থাকে। চক্র এবং কোয়াৎ´জ সূত্রের ধ্রুবকগুলি জানা থাকলে চক্রের খুব কাছে বায়ুর স্পন্দনের সরণ বা বেগবিস্তারের চরম মাপ পাওয়া সম্ভব। তবে এখানেও

চিত্র 16.14(c)—বয়েজ-এর সংশোধিত র‍্যালে-চক্র

কণাবেগ বেশী না হলে সূক্ষ্ম মাপজোখ সম্ভব নয়। 16.14c চিত্রে বয়েজ-এর উদ্ভাবিত সূক্ষ্ম দ্বি-অনুনাদক দেখানো হয়েছে—তার সরু সংযোগ-নল বা কণ্ঠে চক্র ও আয়না থাকে। এই যন্ত্রে সাড়া দেওয়ার ক্ষমতা প্রায় কানের সমান।

র‍্যালে-চক্রের আচরণের তাত্ত্বিক গণনায় কিং দুটি ত্রুটি সংশোধন করেছেন —(ক) শব্দক্ষেত্রে চক্রের উপস্থিতিতে বিবর্তন হওয়ায় তীব্রতার পরিবর্তন

হয় ; (খ) প্রত্যাবর্তী শাব্দচাপের ক্রিয়ায় চক্রের দোলন হয়। চক্রের ও আশে-পাশের বায়ুর বেগবিস্তারের অনুপাত β হলে, ১৬-১২.১ সূত্রের দ্বন্দ্বভ্রামক G-কে আভ্যগুণিতক $(1-\beta)^2$ দিয়ে গুণ করতে হবে। চক্রের ভর M এবং তার দ্বারা স্থানান্তরিত প্রবাহীর ভর m হলে

$$\beta = \frac{m + \frac{4}{3}\rho r^3}{M + \frac{4}{3}\rho r^3}$$

এ ছাড়াও, প্রবাহীর সান্দ্রতা এবং চক্রের কাছাকাছি বায়ুস্রোতের অশান্ত অবস্থা ক্যোনিগ-সূত্রে অন্য ত্রুটিও আনে।

গ. নানারকম প্রয়োগের মধ্যে **মাইক্রোফোন-ক্রমাংকনের কাজে** র‍্যালে-চক্রের ব্যবহার সবিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। সেই উদ্দেশ্যে সচল এবং স্থাণু শব্দতরঙ্গে মাইক্রোফোনের **শাব্দচাপ-সংবেদন** অর্থাৎ দুইজাতীয় তরঙ্গে মাইক্রোফোনের সাড়া/শাব্দচাপ—এই অনুপাতটি নির্ণয় করা হয়। প্রথম ক্ষেত্রে প্রতিধ্বনিরহিত এক ঘরের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে প্রথমে র‍্যালে-চক্র দিয়ে লাউড-স্পীকার-জাত শব্দের দরুন বেগবিস্তার এবং পরে সেই সেই বিন্দুতে মাইক্রোফোন দিয়ে শাব্দচাপবিস্তার মেপে তার ক্রমাংকন করা হয়; কম্পাংক 300 থেকে 10^4 চক্রের মধ্যে থাকবে। দ্বিতীয় ক্ষেত্রে এক অর্গান-নলের এক-মুখে লাউড-স্পীকার অন্য-মুখে মাইক্রোফোন ছদ এবং ভেতরে র‍্যালে-চক্র রাখা হয়। মাইক্রোফোন সরিয়ে সরিয়ে র‍্যালে-চক্রে বেগ-সুস্পন্দবিন্দু আনা হয়; এ থেকে সেই বিন্দুতে কণা-বেগ এবং মাইক্রোফোনে সক্রিয় চাপ পাওয়া যায় এবং তাদের অনুপাত থেকে শাব্দচাপ-সংবেদন মেলে। এখানে 60 থেকে 3500 পর্যন্ত কম্পাংক ব্যবহার করা যায়।

১৬-১৩. বিকিরণ-চাপ ও তীব্রতা:

৬-১০ অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে, আপতন-তলের ওপর শব্দতরঙ্গ প্রত্যাবর্তী শাব্দচাপ ছাড়াও ধ্রুবমান বিকিরণ-চাপ প্রয়োগ করে। দ্বিতীয়ের মান অতি অল্প—বায়ু-মাধ্যমে প্রবল শব্দের ক্ষেত্রে বিকিরণ-চাপ শাব্দচাপের হাজার ভাগের এক ভাগ মাত্র। কাজেই এই চাপ-মাপা খুবই কঠিন। কিন্তু শাব্দতীব্রতার সঙ্গে তার সম্পর্ক খুবই সরল ব'লে, তা-থেকে তীব্রতার চরম মান পাওয়া সম্ভব। ৬-১০.২ সূত্র থেকে

$$I = c\overline{E} = c\,p_R/(\gamma+1) \qquad (১৬\text{-}১৩.১)$$

৯-২(৩) অনুচ্ছেদে বর্ণিত রেডিওমিটার তথা ব্যাবর্তন-পাত দোলকের সাহায্যে p_R মাপা যায়; বিকিরণ-চাপের ক্রিয়ায় চাক্তির বিক্ষেপ হয় এবং যন্ত্রের শীর্ষস্ফুটি ঘুরিয়ে তাকে সাম্য অবস্থানে ফেরানো হয়। এই ঘূর্ণন θ, বিলম্বন-সূত্রের ব্যাবর্তন-ধ্রুবক ζ, দোলন-বাহুর দৈর্ঘ্য r এবং আপতিত শব্দকিরণের প্রস্থচ্ছেদ A হলে, শব্দের বিকিরণ-চাপ হয়

$$p_R = \zeta\theta/rA \qquad (১৬-১৩.২)$$

বায়ু-বাহিত শব্দের বেলায় এই পদ্ধতি বিশেষ সূক্ষ্ম নয়, কিন্তু তরল-বাহিত প্রচণ্ড স্বনোত্তর তরঙ্গের তীব্রতা মাপার ক্ষেত্রে খুবই উপযোগী। এই পদ্ধতির নানা সংস্কার হয়েছে, তবুও এর ব্যবহার বিশেষভাবে সীমিত। তরলের সান্দ্রতা কম হলে, $10\,Mc$ কম্পাংকের উর্ধ্বে প্রায় $\pm 5\%$ সূক্ষ্মতা পাওয়া যায়।

১৬-১৪. ঘনত্ব-বিস্তার, শাব্দচাপ ও শাব্দ-তীব্রতা:

বায়ুস্তম্ভে স্থাণুতরঙ্গ থাকলে ঘনীভূত জায়গায় ঘনত্ব বাড়ে, তনুভূত জায়গায় কমে। সেই সেই জায়গায় শাব্দচাপ যথাক্রমে বেশী এবং কম। তাদের মধ্যে নির্দিষ্ট সম্পর্ক রয়েছে। আমরা জানি

$$P_0 V_0^{\gamma} = PV^{\gamma} \text{ বা } P_0 = P\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{\gamma}\text{; সুতরাং অবকলন ক'রে পাব}$$

$$\frac{dP}{P_0} = \gamma\,\frac{d\rho}{\rho_0} \quad \text{বা} \quad dP = \gamma P_0\,\frac{d\rho}{\rho_0} \qquad (১৬-১৪.১)$$

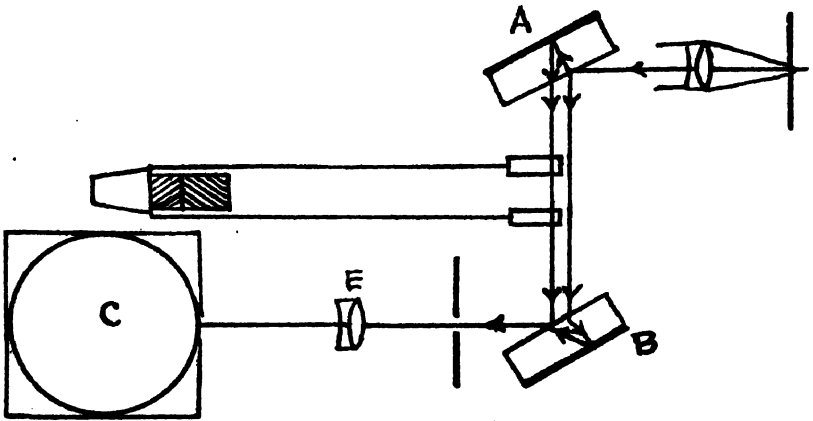
এই সূত্র শাব্দচাপ (dP) এবং ঘনত্বভেদের ($d\rho$) মধ্যে সম্পর্ক নির্দেশ করে।

১৮৭০ সনে টপ্‌লার ও বোল্ট্‌জ্‌ম্যান নিনাদী অর্গান-নলের সরণ-সুস্পন্দ-বিন্দুতে ঘনত্বভেদ মাপার এক আলোকীয় ব্যতিচার পদ্ধতি উদ্ভাবন করেন। পদ্ধতিটিতে জামা (Jamin)-উদ্ভাবিত ব্যতিচারমান যন্ত্র ব্যবহৃত হয়। র‍্যাপ্‌স্ পরে এর আরও উন্নতিসাধন করেছেন।

16.15 চিত্রে যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। সমান্তরাল সাদা আলো 45° কোণে বসানো A কাচ-আয়ত থেকে পূর্ণ-প্রতিফলিত হয়; সমুখের এবং পেছনের পাতে আংশিক প্রতিফলনের ফলে দুটি নিম্নমুখী কিরণ দেখা যাচ্ছে; তাদের একটি, কাচের জানলা দিয়ে অর্গান-নলের ভেতরে ঢোকে আর একটি জানলা দিয়ে বেরিয়ে আসে। অপরটি, এরই সমান্তরালে নলের বাইরে দিয়ে আসে। দ্বিতীয় কাচ-আয়তের (B) ক্রিয়ায় তারা মিলিত হয়ে E-অভিনেত্রে পড়ে।

কিরণ দুটির অতিক্রান্ত পথ আলাদা হওয়ায় E-এর দৃষ্টিপটে ব্যতিচার-পটি দেখতে পাওয়া যাবে। এখন যে কিরণটি নলের মধ্যে ঘনীভূত স্তরের মধ্য দিয়ে আসবে, তার ঐ জায়গায় বেগ কমে যাওয়ায় সেই কিরণের পথদৈর্ঘ্য বেড়ে যাবে এবং ব্যতিচার-পটিগুলি কাঁপতে থাকবে। ভ্রমিদৃক্ পদ্ধতিতে সেই সরণ (ε) মাপা সম্ভব ; তা ছাড়া, ঘূর্ণমান আলোক-সচেতন প্লেট ব্যবহার ক'রেও ε মাপা যায়।

গ্ল্যাডস্টোন ও ডেল সূত্রানুসারে মাধ্যমের আলোক প্রতিসরাংক ও ঘনত্বের মধ্যে সম্পর্ক হচ্ছে, $(\mu-1)/(\mu_0-1)=\rho/\rho_0$

অর্থাৎ $$(\mu-\mu_0)=(\mu_0-1)\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0} \qquad (৬\text{-}১৪.২)$$

চিত্র 16.15—শাব্দচাপবিস্তারের মাপন-প্রণালী

এখন l পথ অতিক্রম করতে যদি মাধ্যমের আলোক-প্রতিসরাংকের পরিবর্তন μ_0 থেকে μ হয়, তাহলে প্রতিসম পথভেদ $(\mu-\mu_0)l$ হবে। ব্যতিচার-পটির সরণ ε এবং আলোর গড় তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ হলে, আমরা ১৬-১৪.১ এবং ১৬-১৪.২ সমীকরণ দুটি থেকে পাচ্ছি

$$\varepsilon\lambda=(\mu-\mu_0)l=l(\mu_0-1)\frac{d\rho}{\rho_0}=(\mu_0-1)l\,\frac{dP}{\gamma P_0}$$

$$dP=\frac{\gamma_0 P_0\varepsilon\lambda}{(\mu_0-1)l} \qquad (৬\text{-}১৪.৩)$$

এই পন্থা সরল ও প্রত্যক্ষ। $dP = p$ ধ'রে আমরা সহজেই শাব্দ-তীব্রতা বার করতে পারি। মাপার মধ্যে কোন সময়ক্ষেপের প্রশ্ন নেই। তবে শব্দ খুব জোরালো না হলে এই পন্থাটিও কার্যকর নয়, আর অর্গান-নলের প্রতিটি অংশ সুদৃঢ় অর্থাৎ অকম্পিত না থাকলে ব্যতিচার-পটির সরণের মাপনে কমবেশী ত্রুটি আসবে।

প্রশ্নমালা

১। শব্দের বিশ্লেষণ বলতে কি বোঝায়? এখানে শব্দতরঙ্গের কি কি ভৌত বৈশিষ্ট্য প্রাসঙ্গিক? শব্দের কোন্ কোন্ অনুভূতির সঙ্গে তারা সম্পর্কিত?

২। শব্দতরঙ্গের রূপরেখা-লেখনের বিভিন্ন পন্থা আলোচনা কর। গৃহীত রূপরেখা থেকে সবগুলি আঙ্গিক কি-ভাবে মেলে? এই পরীক্ষণগুলিতে কি কি ব্যাপারে লক্ষ্য রাখা দরকার?

৩। বায়ুবাহিত শব্দের সুরবিশ্লেষণের সরাসরি পন্থা কি কি আছে? তাদের মধ্যে সবচেয়ে সূক্ষ্ম পরীক্ষাটি বল।

৪। সাধারণ পরীক্ষাগারে যথাসম্ভব সূক্ষ্মতায় সুরশলাকার কম্পাংক-নির্ণয়ের পন্থাটি লেখ। এই মাপনের গুরুত্ব কি? র‍্যালে-র শাব্দচক্র এবং ভ্রমিদৃক্ পদ্ধতির সূক্ষ্মতার তুলনামূলক আলোচনা কর।

৫। শাব্দতীব্রতা বলতে ঠিক কি বোঝায়? রাশিটি কিসের কিসের ওপর নির্ভরশীল? এই মাপনে অসুবিধাগুলির বিস্তারিত বিশ্লেষণ দাও।

৬। চাপবিস্তার, বেগবিস্তার এবং ঘনত্ববিস্তার মাপার সূক্ষ্ম পরীক্ষাগুলি বর্ণনা কর।

৭। আর কি কি পদ্ধতিতে শাব্দতীব্রতা মাপা যায়? এই মাপনের পরম পদ্ধতি কিছু আছে কি? জানলে, বর্ণনা কর।

৮। র‍্যালে-চক্র সম্বন্ধে একটি বিস্তারিত আলোচনা কর। র‍্যালে-র সূত্রে কি কি ত্রুটি আছে?

১৭

শারীর স্বন ও সুস্বর

(Physiological Acoustics and Musical Sound)

১৭-১. বিষয়-পরিচিতি :

এই অধ্যায়ে আমাদের আলোচ্য বিষয়—ধ্বনিবিচার ; ধ্বনি বলতে আমরা বুঝব কণ্ঠধ্বনি এবং বাদ্যধ্বনি। কণ্ঠধ্বনির উৎপত্তি আমাদের বাক্‌যন্ত্রে, আর বাদ্যধ্বনির উৎপত্তি নানা সুরযন্ত্রে ; এদের সন্ধান তথা গ্রহণ, ঘটে আমাদের কাণে বা শ্রবণযন্ত্রে ; শেষে অনুভূতি এবং বিচার হয় মস্তিষ্কে। কাজেই এই বিষয়ে মানবদেহযন্ত্রের গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা রয়েছে এবং পদার্থবিদ্যাকে এখানে কিছুটা শারীরতত্ত্বের আর কিছুটা মনস্তত্ত্বের দ্বারস্থ হতে হয়। ধ্বনিবিচার প্রধানত অনুভূতিগ্রাহ্য—সুতরাং তার বেলায় সূক্ষ্ম এবং সুনিশ্চিত মাপজোখ সম্ভব নয়। স্থান, কাল, পরিবেশ বা মানসিকতাভেদে একই শ্রোতার বিচারে একই ধ্বনির ভিন্ন ভিন্ন অনুভূতি হতে পারে ; ভিন্ন ভিন্ন লোকের কাছে ভিন্ন বোধ তো হতেই পারে। গান বা গোলমালের ব্যাপারে ব্যক্তিগত প্রতিক্রিয়া থেকেই তা বোঝা যায়।

এই আলোচ্য বিষয়ের মূল ভিত্তি—বাক্‌ ও শ্রবণযন্ত্রের গঠন ও কার্যপ্রণালী ; আর মূল বিবেচ্য, **সুস্বর** এবং **অপস্বরের** উৎপত্তি এবং প্রকৃতি-বিশ্লেষণ। সাধারণভাবে সুস্বর বা সুরেলা শব্দ শ্রুতিমধুর আর অপস্বর বা গোলমাল শ্রুতিকটু—যদিও এই সরলীকৃত শ্রেণীভেদ সবার ক্ষেত্রে বা সব সময়ে খাটে না। পদার্থবিদ্যার বিচারে নিয়মিত পর্যাবৃত্ত শব্দ সুস্বর আর ক্ষণ- বা ঘাত-শব্দ মাত্রেই অপস্বর। এই শ্রেণীভেদ তরঙ্গের ভৌতধর্ম-নিয়ন্ত্রিত এবং অনুভূতি-নিরপেক্ষ।

সুস্বর বা সুরেলা শব্দ, মিশ্র (note) বা বিশুদ্ধ (tone) হতে পারে। এখন থেকে বিশুদ্ধ সুস্বরকে আমরা **সুর** বা **তান** ব'লবো। **স্বরমাত্রেই** কতকগুলি সুর বা তানের সমষ্টি মাত্র। ১০-১২ অনুচ্ছেদে আলোচিত উদাহরণগুলির প্রতিটি তরঙ্গই স্বর, আর বিশ্লেষণলব্ধ আঙ্গিকগুলির প্রতিটিই সুর। স্বরবৈশিষ্ট্য তিনটি, যথা—স্বনতীক্ষ্ণতা (pitch), স্বনজাতি (timbre, tonal quality) এবং স্বনপ্রাবল্য (loudness) ; এরা ইন্দ্রিয়সাপেক্ষ অনুভূতি, সুতরাং

ভৌতরাশি নয়, কাজেই সুনিশ্চিতভাবে পরিমেয়ও নয়। তবে মোটামুটিভাবে এরা যথাক্রমে, স্বনকের কম্পাংক (বা উৎপন্ন শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য), স্বনকের স্পন্দনরীতির (অর্থাৎ শব্দতরঙ্গরূপ) আর স্বনকের ক্ষমতা বা শক্তিবিকিরণহার (অর্থাৎ মাধ্যমে উৎপন্ন শাব্দক্ষেত্রে তীব্রতা), তিন প্রাচলের ওপর নির্ভরশীল। আগের অধ্যায়েই দেখেছি যে এই তিনটি পরিমেয় ভৌতরাশি। তাহলেও শাব্দতীব্রতা স্বনতীক্ষ্ণতাকে এবং কম্পাংক স্বনপ্রাবল্যকে প্রভাবিত করে, আবার কানে যে তরঙ্গরূপ পৌঁছয় তার স্বনজাতি আর যে স্বনজাতি অনুভূত হয় তারা এক না হতেও পারে (যথা, শ্রুতি-সমমেল এবং কর্ণসাপেক্ষ যুক্তস্বন— § ১১-৭ এবং ১১-৮)। মিশ্র শব্দে অর্থাৎ সুস্বরে স্বনতীক্ষ্ণতা বা স্বনজাতির সঠিক ভূমিকার বিচার দুরূহ সমস্যা।

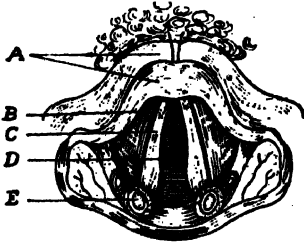
বর্তমান শব্দসর্বস্ব নাগরিক সভ্যতায় দেহ এবং মনের ওপর অপস্বর অর্থাৎ গোলমালের ক্ষতিকারক প্রভাব সম্বন্ধে চিকিৎসক, মনোবিজ্ঞানী এবং সমাজবিজ্ঞানীরা খুবই সজাগ এবং সচেতন হয়ে উঠেছেন। পরিবেশ-দূষণের এখন অন্যতম স্বীকৃত আসামী—গোলমাল।

১৭-২. বাক্‌যন্ত্র (Human Vocal Organ):

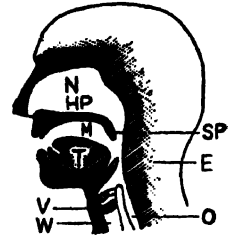
স্বনক হিসাবে আমাদের কাছে এটি সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ, কেননা সব সুরস্বনকের মধ্যে এটিই একান্তভাবে ব্যক্তিগত, প্রাচীনতম এবং সবচেয়ে নিখুঁত যন্ত্র; সভ্যতাভিমানী মানুষের তৈরী কোন যন্ত্রটিই এর মতো মজবুত ও বিশ্বস্ত নয়, কোনটিই স্বনতীক্ষ্ণতা, স্বনজাতি এবং স্বনপ্রাবল্যে এত বিচিত্র এবং বিস্তারিত পাল্লা জুড়ে কর্মক্ষম নয়। জীবজগতেও আমাদের বাক্‌যন্ত্র অনন্য।

স্বরোৎপাদনে মুখ্যতম ভূমিকা নেয় স্বরযন্ত্র (larynx), তার প্রধান সহায়ক ফুস্‌ফুস (lungs) এবং কণ্ঠনালী (trachea), আর গৌণ সহায়ক নাক, মুখ, গলা প্রভৃতি বায়ুগহ্বর এবং ললাটস্থ নানা নালিকা (sinus)-শ্রেণী। ফুস্‌ফুস কণ্ঠনালীর মধ্যে দিয়ে বায়ুস্রোত পাঠিয়ে স্বরযন্ত্রে স্পন্দন সৃষ্টি করে, আর বায়ুগহ্বরগুলি অনুনাদ ঘটিয়ে সেই স্পন্দনবেগ জোরদার করে।

ক. **বাক্ বা স্বরযন্ত্র** (চিত্র 17.1): আমাদের গলার সামনের দিকে শ্বাসনালীতে এটি থাকে। **স্বরতন্ত্রী** (vocal cord, C) নামে পাতলা, একজোড়া চ্যাপ্টা ঝিল্লী এর প্রধান অঙ্গ; তারা শ্বাসনালীতে (D) প্রায় আড়াআড়িভাবে থেকে বায়ুপথ প্রায় রুদ্ধ ক'রে রাখে। তাদের মধ্যে সরু

একফালি ফাঁক থাকে, তাকে বলে শ্বাসরন্ধ্র। একজোড়া মাংসপেশী এই ফাঁকের প্রস্থ এবং স্বরতন্ত্রীর ওপর টান নিয়ন্ত্রণ করে। 17.1 চিত্র Laryngoscope যন্ত্রে দেখা ছবির রেখাচিত্র; এতে A আলজিভ, B মেকী স্বরতন্ত্রী, C আসল স্বরতন্ত্রী, D শ্বাসনালী এবং E স্বরযন্ত্রের সামনের আবরণ নির্দেশ করছে।

17.1 চিত্র
স্বরযন্ত্রের গঠন

খ. অনুনাদী গহ্বর (চিত্র 17.2) অনুনাদ ঘটিয়ে স্বরতন্ত্রীর (V) স্পন্দনকে বিবর্ধিত করে মূলত মুখগহ্বর (M) এবং নাসিকাগহ্বর (N); তাদের মধ্যে ব্যবধান রচনা করে তালুর কঠিন এবং নরম অংশ (HP, SP)। জিভ (T) এবং আলজিভ (E) যথাক্রমে মুখগহ্বরের আয়তন এবং খাদ্যনালীর (O) রন্ধ্রব্যাস নিয়ন্ত্রিত করে। শ্বাসনালী (W) দিয়ে ফুস্ফুস থেকে বায়ুস্রোত এসে স্বরতন্ত্রীকে কাঁপায়।

অনুনাদী গহ্বরগুলির আকার এবং আয়তন বক্তার নিয়ন্ত্রণাধীন; এদের আকার এবং সীমারেখা ইচ্ছামতো বদল ক'রে নির্দিষ্ট পাল্লার মধ্যে অনুনাদী কম্পাংকগুলি বদ্‌লানো সম্ভব; চোয়াল, জিভ, ঠোঁট, তালু, দাঁত—এদের সাহায্যে প্রয়োজনীয় পরিবর্তনগুলি ঘটানো চলে। যেমন, হ্রস্ব স্বরবর্ণ, অ-উচ্চারণে, মুখের আকার নলের মতো হয়, দীর্ঘ স্বর আ বলতে হলে, দেখায় চোঙার মতো, ও বলতে মোটা, বেঁটে গলার বোতলের মুখ, আবার উ বলতে সরু, লম্বা গলা বোতলের মতো; এ বা ঈ বলতে হলে জিভ অল্প মুড়তে হয়। ব্যাকরণে ঘোষ বা অঘোষ বর্ণ, তালব্য, মূর্ধা বা দন্ত্য উচ্চারিত বর্ণমালার এবং ক, চ, ট, ত এবং প বর্গীয় শব্দশ্রেণীর নামকরণের আসল তাৎপর্য এখানেই। খেয়াল ক'রে দেখ যে, তিনটি শ, ষ, স বা দুই ন, ণ সঠিকভাবে উচ্চারণ করতে গেলেই জিহ্বাগ্র মুখগহ্বরের যথানামীয় অংশগুলি (তালু, মূর্ধা, দন্ত) স্পর্শ করে।

চিত্র 17.2—স্বরোৎপাদনে অনুনাদী গহ্বর

স্বরোৎপত্তি-প্রকরণ: স্বাভাবিকভাবে নিশ্বাসপ্রশ্বাস-চলাকালে স্বরতন্ত্রী থাকে শিথিল, তাদের মাঝে স্বররন্ধ্র থাকে প্রশস্ত, ফলে শ্বাসনালীতে বায়ুস্রোত

চলে অবাধেই। কথা বলতে গেলেই স্বরতন্ত্রীগুলির ওপর টান পড়ে, তারা কাছাকাছি এসে স্বররন্ধ্র সংকীর্ণ ক'রে ফেলে। ফুসফুস থেকে বায়ুস্রোত এসে স্বররন্ধ্র অতিক্রম ক'রে গেলেই তন্ত্রীর মুক্ত প্রান্তগুলি পত্রীর মতো কাঁপতে থাকে। যন্ত্রের কল্যাণে দেখা গেছে যে, তাদের এই পরবশ স্পন্দন সরল দোল-জাতীয়; অথচ সাধারণভাবে কণ্ঠস্বরের সরণ-কাল-রেখা বিশেষ জটিল। নিয়ন্ত্রক পেশীর টানে স্বরপত্রীগুলির টান, বেধ, দৈর্ঘ্য, মধ্যবর্তী রন্ধ্র সবই বদ্‌লায়—তাই এই জটিলতা। বাক্‌যন্ত্রবীক্ষণ (Laryngoscope) যন্ত্রে ভ্রমিদৃক্ পদ্ধতিতে নিরীক্ষণ ক'রে এইসব তথ্য জানা গেছে। স্বরতন্ত্রীর কম্পাংক 75 থেকে প্রায় 500 চক্র/সে পাল্লার মধ্যে বদ্‌লানো যায়। কণ্ঠস্বরের কম্পাংক সাধারণভাবে দুই অষ্টকের মধ্যে ওঠা-নামা করে। পুরুষমানুষের ক্ষেত্রে স্বরতন্ত্রীর মুক্ত অংশের দৈর্ঘ্য ($\simeq$ 1.8 সেমি), স্ত্রীলোকের ($\simeq$ 1.0 সেমি) বা শিশুর তুলনায় বেশী এবং বেধে মোটা হওয়ায় মূল কম্পাংক অপেক্ষাকৃত কম, স্বর তুলনায় গম্ভীর এবং সুরসমৃদ্ধ। পত্রীর তলায় মেকী স্বরতন্ত্রী (17.1 চিত্রে B) ঝিল্লীশ্রেণীর এক উপাংশ; দরকারমতো তাকে মুক্ত প্রান্তের দিকে ছড়িয়ে দিয়ে কিম্বা গুটিয়ে নিয়ে, তন্ত্রীর ভরবিন্যাসে পরিবর্তন এনে স্বরকম্পাংক এবং স্পন্দনবৈশিষ্ট্য নিয়ন্ত্রিত করা যায়।

ফুসফুস থেকে বাতাস শ্বাসনালীতে ঢুকলে, সেই চাপে স্বরতন্ত্রী দুটি নমিত হয়, ফলে স্বররন্ধ্র চওড়া হয়ে যায় এবং এক দমক বায়ু বেরিয়ে গিয়ে চাপ কমে যায় এবং তন্ত্রী দুটি পূর্বাবস্থায় ফিরে আসে। ইতিমধ্যে তাদের পেছনে বায়ুস্রোতজনিত চাপ আবার বাড়তে থাকে, যথেষ্ট বাড়লে আবার খানিকটা

চিত্র 17.3—স্বরতন্ত্রীর শ্লথন-স্পন্দন

হাওয়া এক দমকায় বেরিয়ে যায়। কথা-বলাকালে এই চক্রই বারবার আবৃত্ত হতে থাকে। স্পষ্টতই স্বরতন্ত্রীর স্পন্দন-শ্লথন দোল-জাতীয় (§ ২-৯)—তার ফলে শ্বাসনালীতে নিয়মিত বায়ুস্রোত খণ্ডিত হয়ে দমকা বায়ুর কয়েকটি ঝাপ্টায় পরিণত হয়। এইভাবে যে বায়ুস্রোতের বেগ এবং চাপবৈষম্যের ক্রমান্বয়ে তারতম্য (modulation) হতে থাকে, সেটিই স্বরোৎপত্তির কারণ।

স্বররন্ধ্রোত্তর বায়ুস্রোতের তরঙ্গরূপ করাতদন্তুর-জাতীয় (চিত্র 17.3)—আমরা আগে [১০-১২(৩) অনুচ্ছেদে] দেখেছি যে, এই তরঙ্গরূপ সমমেল-সমৃদ্ধ। সংশ্লিষ্ট অনুনাদী বায়ুগহ্বরগুলি সমমেলশ্রেণীর প্রাবল্য আরও বাড়ায়। নির্দিষ্ট অনুনাদকের ক্রিয়াযোগে নির্দিষ্ট স্বরপত্রীযুগ্ম, সুনির্দিষ্ট কম্পাংকের এবং স্বনজাতির স্বরোৎপাদন করে—এটিই ব্যক্তিগত স্বর। বিভিন্ন স্বরে উপসুরের সংখ্যা, তীক্ষ্ণতা, ক্রম, আনুপাতিক প্রাবল্য প্রভৃতি ভিন্ন ভিন্ন হওয়ায় ব্যক্তিগত কণ্ঠস্বর আঙুলের ছাপের মতো একান্ত নিজস্ব হয়ে দাঁড়ায়। কোন কোন কণ্ঠস্বরে ৩৫টি পর্যন্ত উপসুর পাওয়া গেছে; তাদের মধ্যে কেউ কেউ আবার সরল দোলীয় নয়।

স্বরযন্ত্রের ক্রিয়া দ্বিপত্রী বাতবাদ্যযন্ত্রের (§ ১৭-১৭খ) সঙ্গে অনেকটাই তুলনীয়। ফুস্‌ফুস এক্ষেত্রে হাপরের, স্বরতন্ত্রীরা দুই পত্রীর এবং গহ্বরগুলি অনুনাদী বায়ুস্তম্ভের কাজ করে। স্বরতন্ত্রী অতিক্রম ক'রে যে বায়ুস্রোত বেরোয় তা প্রকৃতিতে নিঃসারী বা জেট্-সুরের (§ ১৪-৮খ) মতো।

১৭-৩. উচ্চারিত শব্দ :

আমরা দেখলাম যে, ফুস্‌ফুস থেকে স্বররন্ধ্রের মধ্য দিয়ে দমকা বায়ুস্রোত পাঠিয়ে এবং নাক-মুখ-গলা প্রভৃতি নানা গহ্বরে অনুনাদ ঘটিয়ে স্বরোচ্চারণ করা হয়। শক্তিবাহী এই বায়ুস্রোতের বেগ তথা চাপের তারতম্য ঘটায়, শ্রবণগ্রাহ্য শব্দ উৎপন্ন হয়। স্বরতন্ত্রী যদি এই তারতম্য ঘটায়, তাহলে কণ্ঠধ্বনি বেরোয় আর তাদের বাদ দিলে আসে শ্বাসশব্দ।

কণ্ঠধ্বনির ক্ষেত্রে স্বরতন্ত্রীর স্পন্দন বায়ুস্রোতে বিঘ্ন ঘটায়; তাতে বায়ুস্রোতের বেগ ও চাপের তারতম্য হয়ে সমমেলসমৃদ্ধ করাতদন্তুর তরঙ্গরূপ সৃষ্টি হয়। নাক-মুখ-গলা প্রভৃতি বায়ুগহ্বরে অনুনাদ হয়ে এই চাপ-তরঙ্গে আরও নানা বৈশিষ্ট্যপূর্ণ তারতম্য আরোপিত হয়; এদের আয়তন ও আকৃতি বক্তার নিয়ন্ত্রণাধীন হওয়ায় তরঙ্গরূপের বহুরকম পরিবর্তন সম্ভব, কাজেই নানা রকমের ও নানা ভাবে শব্দোচ্চারণ সম্ভব। উৎপন্ন তরঙ্গরূপের ফুরিয়ার বিশ্লেষণ ক'রে উচ্চারিত **শাব্দবর্ণালী** অর্থাৎ উপস্থিত সুরগুলির কম্পাংক, আনুপাতিক প্রাবল্য, ক্রমসংখ্যা প্রভৃতি জানা যায়। উচ্চ ক্রমের উপসুরগুলি বায়ুগহ্বর-অনুনাদ-নিয়ন্ত্রিত হওয়ায়, অনেকসময়েই বিষমমেল হতে দেখা যায়; এইসব অনুনাদ, শক্তিবাহী তরঙ্গের অন্তর্ভুক্ত এক বা একাধিক সমমেলের ক্রিয়াতেই ঘটে। বায়ুস্রোত এবং গহ্বরমধ্যস্থ বায়ুপুঞ্জের মধ্যে যান্ত্রিক যোজনের ফলে দুয়েরই স্বভাবী কম্পাংক পাল্টে যায়।

ফিস্‌ফিসয়ে কথা-বলার সময়ে স্বরপথে একটানা বায়ুস্রোত চলে। সরু রন্ধ্রপথে সজোরে বাষ্প বেরোলে যেমন হাওয়ায় ঘূর্ণিসৃষ্টি হয়ে হিস্‌হিস্ ক'রে শব্দ হতে থাকে, এক্ষেত্রেও তেমনি অসমান স্বরপথে জোরে বায়ুস্রোত চলায় ফিস্‌ফিসানি জন্মায়। ঠোঁট, দাঁত ও জিভের সাহায্যে এই বায়ুস্রোতের তারতম্য ঘটিয়ে ক, ট, প, স প্রভৃতি **ব্যঞ্জনবর্ণ** উচ্চারিত হয়। অনুচ্চারিত শাব্দবর্ণালী শ্রবণ-পাল্লার ঊর্ধ্বসীমার দিকে, নির্দিষ্ট কম্পাংকন্তরের (frequency band) মধ্যেই সীমিত থাকে।

স্বরবর্ণমাত্রেই উচ্চারিত আর ব্যঞ্জনবর্ণমাত্রেই উচ্চারিত এবং অনুচ্চারিত দু'রকমেরই হতে পারে। কথা-বলার সময়ে পর্যায়ক্রমে বা একই সঙ্গে অনুচ্চারিত এবং উচ্চারিত দু'রকমেরই শব্দবহ ব্যবহৃত হয়। ফিস্‌ফিসানির সময়ে অনুচ্চারিত অর্থাৎ শ্বাসশব্দই বাহক (carrier) তরঙ্গ—আর তার তারতম্যই বার্তাবহের (information-carrier) ভূমিকা নেয়। অধিকাংশ ক্ষেত্রেই তারতম্য (modulation) ঘটানো হয় শব্দতরঙ্গের সরণবিস্তারে, কোন কোন ক্ষেত্রে আবার শাব্দকম্পাংকে।

সারা পৃথিবীর টেলিফোন-গবেষণাগারগুলিতে বিভিন্ন বর্ণ-উচ্চারণের শাব্দগঠন নিয়ে প্রচুর গবেষণা হয়েছে; কেননা এই গঠনবৈশিষ্ট্য সম্বন্ধে সম্যক্ ধারণা না থাকলে তার-বাহিত শব্দ অবিকৃতভাবে পুনরুৎপাদন করার উপযুক্ত টেলিফোন-বর্তনীর উদ্‌ভাবন সম্ভব নয়। যেমন, শব্দ যত ক্ষণস্থায়ী হবে, পুনরুৎপাদী প্রেরক-বর্তনীর কম্পাংকপাল্লা ততই বিস্তৃত (10.26 চিত্রে d ও d') হতে হবে।

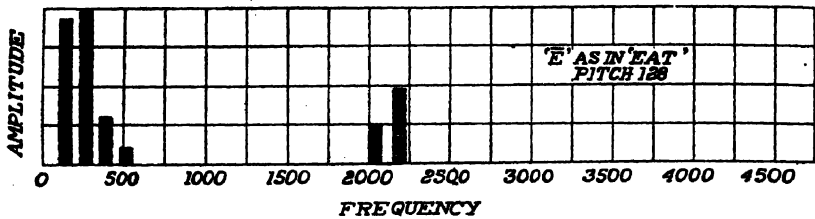
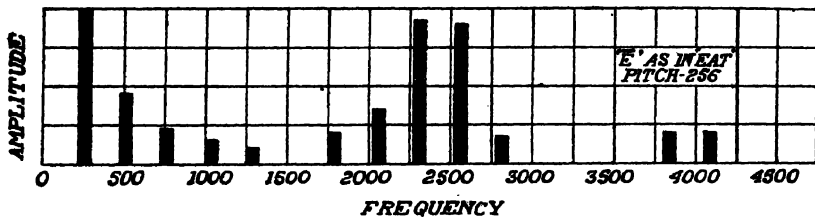
স্বরবর্ণ: এদের সম্বন্ধে গবেষণালব্ধ সিদ্ধান্তগুলি হচ্ছে—

(১) যেকোন স্বরবর্ণেই দুটি বা তিনটি উপসুরগোষ্ঠী (groups of partials) থাকে। তাদের যেকোনটিকেই **সংস্থানক** (formant) বলা হয়। কোন স্বরবর্ণ গঠন করতে স্বল্প কম্পাংকের দুটি সংস্থানকই যথেষ্ট; তৃতীয় সংস্থানকটি গোষ্ঠীর স্বনজাতিকে সমৃদ্ধতর করে।

(২) সংস্থানকে একটি উপসুর প্রধান ভূমিকা নেয়। গোষ্ঠীর অন্য উপসুরগুলির কম্পাংকে, মোটামুটিভাবে এর সঙ্গে সামঞ্জস্য থাকে।

(৩) সংস্থানক কম্পাংক-গোষ্ঠী মোটামুটিভাবে স্বরতন্ত্রীর কম্পাংক-নিরপেক্ষ।

(৪) মুখের এবং গলার ভিন্ন ভিন্ন গহ্বরগুলির আকৃতি বদলে বা অনুনাদ

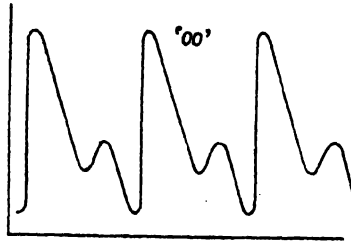
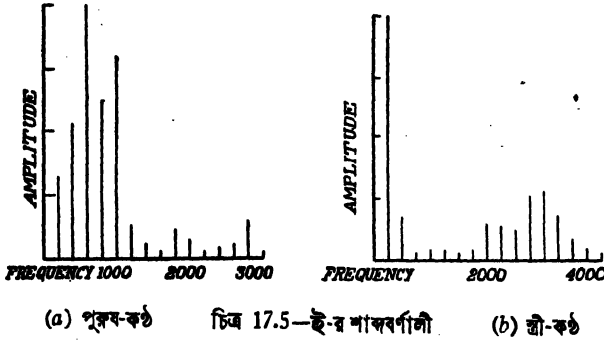
ঘটিয়ে উপস্বরগুলির সঠিক ক্রম ও প্রাবল্যের বিন্যাস ক'রেই ভিন্ন ভিন্ন স্বরবর্ণের উচ্চারণ হয়।

চিত্র 17.4(*a*)—128 চক্রে ঈ-র শাব্দবর্ণালী

চিত্র 17.4(*b*)—256 কম্পাংকে ঈ-র শাব্দবর্ণালী

17.4 (*a*) চিত্রে মূল কম্পাংক 128 ধ'রে ঈ-র শাব্দবর্ণালী অর্থাৎ কম্পাংক-সাপেক্ষে শক্তির (বা সরণবিস্তারের) বণ্টন দেখানো হয়েছে; প্রথম সমমেলের (256~) ক্ষেত্রেও (চিত্র 17.4*b*) সেই বর্ণালী দেখানো হয়েছে; দেখা যাচ্ছে, 250 এবং 2250 চক্রের কাছাকাছিই অনেকটা শক্তি সংহত। আলোর বিকিরণে রেখা-বর্ণালীর সঙ্গে এদের সাদৃশ্য লক্ষণীয়।

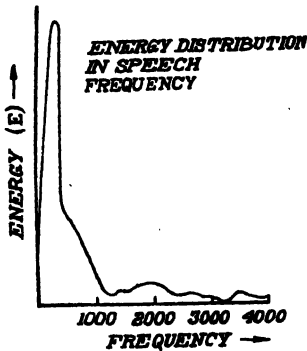
17.5 (*a*) এবং (*b*) চিত্রে ই-র শাব্দবর্ণালী দেখানো হয়েছে। প্রথমটি পুরুষ-কণ্ঠে 200~, দ্বিতীয়টি স্ত্রীকণ্ঠে 250~ মূলকম্পাংক ধ'রে সমঞ্জস বিশ্লেষণ থেকে পাওয়া রেখা-বর্ণালী; দুটিতেই একটি সংস্থানক 450 চক্রের কাছাকাছি অপরটি 3000-এর কাছাকাছি। লক্ষণীয় যে, স্ত্রীকণ্ঠে সুরের সংখ্যা অনেক কম এবং তারা দুর্বল। স্বরবর্ণে সাধারণত সংস্থানক বণ্টন এইভাবেই দুই পাল্লাতে থাকে; যেমন উ (450 এবং 1000~), ঊ (400 এবং 800), ও (500, 850), অ (600, 950), আ (825, 1200), অ্যা (750, 1800), এ (550, 2100) প্রভৃতি। 17.6 চিত্রে ঊ বর্ণের তরঙ্গরূপ দেখানো হয়েছে। সব স্বরবর্ণের তরঙ্গরূপই অল্পবিস্তর

জটিল ; প্রতিটিরই সাধারণ তরঙ্গছাঁদ স্বকীয়বৈশিষ্ট্যযুক্ত—যদিও ব্যক্তিবিশেষে খুঁটিনাটি বদ্‌লায়।

(*a*) পুরুষ-কণ্ঠ চিত্র 17.5—ই-র শাব্দবর্ণালী (*b*) স্ত্রী-কণ্ঠ

চিত্র 17.6—উ-র শাব্দবর্ণালী

ব্যঞ্জনবর্ণ : স্বরবর্ণ উপ-স্থিত (quasi-steady) ; তাদের সঙ্গে অচির (transient) বা অবস্থান্তরী শব্দ জুড়ে ব্যঞ্জনবর্ণ পাওয়া যায়। এদের বিশ্লেষণ অনেক বেশী কঠিন ; বিজ্ঞানী প্যাজেট-এর মতে, ক-এর প্রধান কম্পাংক 3000 ~ , থ-এর 2500 থেকে 3400 চক্র পর্যন্ত, ফ-এর 5000 থেকে 6000-এর মধ্যে, শ-এর 3000-এর বেশী, স-এর 6000-এরও বেশী। আবার ম বা ন-এর মতো নাকী (nasal) বর্ণের প্রধান কম্পাংক 200-এর নিচে হতে পারে। গ, ড, ভ, ব, হ প্রভৃতিরা উচ্চারিত ঘোষবর্ণ ; ল, ম, ন দীর্ঘ এবং পর্যাবৃত্ত বর্ণ। আবার, অনুচ্চারিত বা অঘোষ বর্ণও আছে। ব্যঞ্জনবর্ণ আবেগী প্রকৃতি (impulsive)—অস্থায়ী শব্দ থাকার জন্যেই তা হয় ; অস্থায়ী উপসুরগুলিই প্রধানত এদের বৈশিষ্ট্য নিয়ন্ত্রিত করে। কারো কথায় ব্যঞ্জনবর্ণ পরিষ্কারভাবে উচ্চারিত হলেই তবে তার বাচনভঙ্গী পরিষ্কারভাবে বোঝা যায়।

এইসব বিশ্লেষণে প্যাজেট, ফ্লেচার, ট্রেন্‌ডেলেন্‌বার্গ, স্টাম্‌ফ্‌ প্রভৃতি

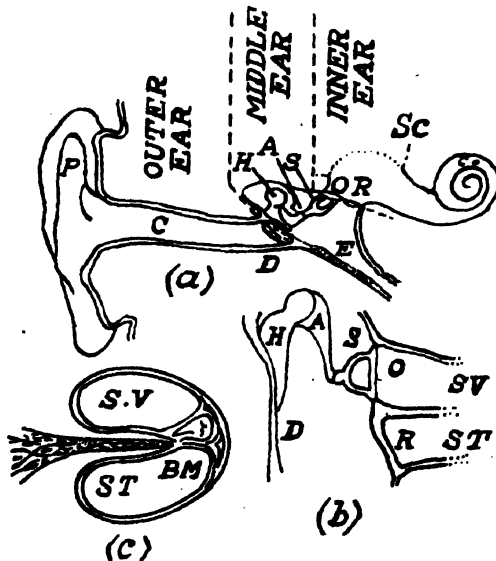
বিজ্ঞানীরা উল্লেখযোগ্য এবং বিস্তারিত পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালিয়েছেন। কৃত্রিমভাবে স্বরবর্ণ উচ্চারণ করাতে নানা জনে নানা পদ্ধতি, নানা যন্ত্র ব্যবহার করেছেন। তাদের মধ্যে **প্যাজেট**-এর **কাজই** সবচেয়ে উল্লেখযোগ্য। তাঁর মতে, মুখের এবং গলার গহ্বরের ভেতরেই স্বরবর্ণের দুই সংস্থানকের উৎপত্তি হয়। তিনি প্ল্যাস্টিসিন দিয়ে নানারকম যৌগ অনুনাদক তৈরি ক'রে যেকোন স্বরবর্ণের উৎপাদনের ব্যবস্থা করেন ; তাতে স্বরতন্ত্রীর ভূমিকায় থাকে একটি ক্যান্টিলেভার-পত্রী আর ফুস্‌ফুসের ভূমিকা নেয় একটি হাপর। হাপর থেকে হাওয়া এসে পত্রীকে কাঁপায় এবং প্ল্যাস্টিসিন-অনুনাদকের সহায়তায় কাঙ্ক্ষিত স্বরবর্ণ উৎপন্ন করে। এঁর আরও ধারণা যে, তন্ত্রীর স্পন্দন প্রকৃতপক্ষে নিম্নকম্পাংকে ঘটে এবং উৎপন্ন তরঙ্গ বাহক-তরঙ্গের কাজ করে ; এদের ওপরে স্পন্দন আরোপিত হলে উচ্চারণে স্পষ্টতা আসে। **ফ্লেচার**-এর মতে পুরুষ-কণ্ঠে স্বরবর্ণ-উচ্চারণে গড় মূলকম্পাংক 124 চক্র/সে, আর স্ত্রীকণ্ঠে তা 244 চক্র/সে। ধারক মাইক্রোফোন এবং সংকীর্ণ-পটি-কম্পাংকে মেলবন্ধ (tuned) বর্তনী সহযোগে **ক্র্যাণ্ডাল** দেখিয়েছেন যে, বিকিরিত শক্তির বেশীভাগই 160 ~/সে কম্পাংকের কাছাকাছি সংহত, তবে 2000-এর কাছাকাছিও (চিত্র 17.7) বিকিরণের পরিমাণ অপেক্ষায় বেশী। বিকিরিত শক্তির 50% ভাগই 350/সে কম্পাংকের মধ্যেই সীমিত থাকে। যদিও বাক্‌শক্তির বেশীভাগই নিম্ন কম্পাংকের মূল সুরগুলিতে সন্নিবিষ্ট ; তারা কিন্তু বাক্‌স্পষ্টতা আনে না, সেটা আসে উচ্চ কম্পাংকের সুরগুলি থেকে।

চিত্র 17.7—কম্পাংকভেদে শক্তি-বণ্টন

১৭-৪. শ্রুতিযন্ত্র :

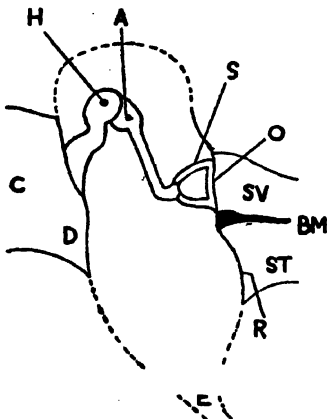
আমরা কানে শুনি। শব্দের গ্রাহক হিসেবেও সে অপ্রতিদ্বন্দ্বী। 1000 থেকে 4000 চক্রের মধ্যে কানের শাব্দচেতনা বা দক্ষতা বিস্ময়কর ; কেননা এই কম্পাংকপাল্লায় (১) যে চাপভেদজনিত শব্দ শোনা সম্ভব, সে চাপ, গায়ে মশা বসলে যে চাপ পড়ে তার এক-সহস্রাংশ মাত্র ! (২) 10^{-10} সেমি সরণবিস্তারের শব্দও কর্ণগ্রাহ্য—H_2 অণুর ব্যাস ($\simeq 10^{-8}$ সেমি) এই সরণের শতগুণ ! (৩) কম্পাংকে মাত্র 0.03% পরিবর্তন শ্রুতিগোচর ;

কম্পাংকভেদ সচেতনতা আরও একটু বেশী হলে, বায়ুতে অণুগুলির তাপজ অক্রম-গতির কারণে সর্বদাই যে ঘনত্ব-ভেদ ঘটে, আমরা তার দরুন চাপ-তরঙ্গ শুনতে পেতাম (পাই না যে, সেটা পরম সৌভাগ্য ; পেলে, কান সদাই ভোঁ-ভোঁ ক'রতো)। (৪) কানে এক সেকেণ্ডে 10^{-16} জুল পরিমাণ শক্তি পৌঁছলেও আমরা শুনতে পাই ; এই হারে শক্তি যোগালে 1 সিসি জল 1° সে গরম হতে 1.3×10^{9} বছর লেগে যেত। (৫) কর্ণগ্রাহ্য চরম ও অবম শাব্দপ্রাবল্যের অনুপাত $10^{14} : 1$; মানুষের তৈরী কোন যন্ত্রেই এই প্রাবল্যভেদ আয়ত্ত নয়। (৬) কান এক স্বাভাবিক ফুরিয়ার-বিশ্লেষক—আমরা ঠিক জানি না এরকম নিখুঁত কম্পাংক-বিশ্লেষণ কেমন ক'রে সম্ভব হয়। কানের তুল্য শব্দগ্রাহী ও বিশ্লেষক আজও মানুষের স্বপ্নই রয়ে গেছে, বাস্তবায়িত হয়নি।

মোটামুটিভাবে কানের তিনটি অংশ—বহিঃকর্ণ, মধ্যকর্ণ, অন্তঃকর্ণ। 17.8(a) চিত্রে তিনটি ভাগই, আর (b) এবং (c) চিত্রে মধ্যকর্ণ এবং অন্তঃকর্ণের রেখাচিত্র আলাদা ক'রে দেখানো হয়েছে।

ক. **বহিঃকর্ণ :** এর তিনটি ভাগ—বাইরে, কানের দৃশ্যমান অংশ কর্ণপত্রক (pinna, 17.8a চিত্রে P), ভেতরে কর্ণকুহর (auditory

চিত্র 17.8— কানের অঙ্গবিন্যাস

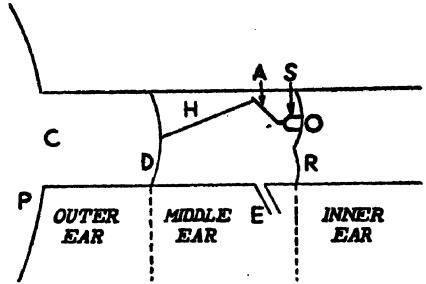
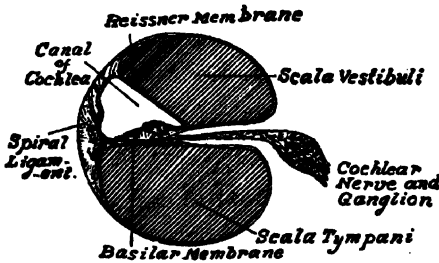
canal, C) এবং কর্ণপটহ (eardrum, D), দুই ভাগ। কর্ণপত্রক তরুণাস্থি (cartilage)-নির্মিত পাত-বিশেষ ; শোনার ব্যাপারে এর কোন ভূমিকা নেই বললেই চলে। কর্ণকুহর (C) প্রায় $2\frac{1}{2}$ সেমি দীর্ঘ এবং $\frac{1}{2}$ সেমি ব্যাসের নল। এই নলে শাব্দচাপ অর্থাৎ আগন্তুক শব্দতরঙ্গের চাপভেদই কানের পর্দাকে স্পন্দিত করে এবং তাই থেকেই আমাদের শোনার সুরু। পোকা-মাকড়, ধুলা-বালি থেকে লোম এবং তেল্‌তেলে একরকম নির্যাস একে রক্ষা করে। কর্ণপটহ (D) খুব পাতলা, সংবেদনশীল এবং সামান্যরকম শংকু-আকৃতির একটি স-টান ছদ। একটি স্বয়ংক্রিয় পেশী দরকারমতো টান বাড়িয়ে ছদটিকে আরও দৃঢ় করতে পারে ; তাতে নিম্ন কম্পাংকে অতিপ্রবল স্পন্দন হতে পারে না। সাধারণ কথার শব্দে কানের পর্দার স্পন্দন-বিস্তার মাত্রা 10^{-8} সেমি মতো, অর্থাৎ H_2-র আণবিক ব্যাসের সমান।

খ. মধ্যকর্ণ (চিত্র 17.9) ঃ এটি একটি ছোট্ট গহ্বরবিশেষ [চিত্র 17.8(b)]। তার শুরুতে কর্ণপটহ (D), আর শেষে ডিম্বাকৃতি গবাক্ষ (fenestra ovalis, O) ; এদের মধ্যে সেতুবন্ধন করছে তিনটি ক্ষুদ্রাস্থি ; আকৃতিগত সাদৃশ্য থেকে তাদের যথাক্রমে হাতুড়ি (M), নেহাই (A) এবং রেকাব (S) নাম দেওয়া হয়েছে। [এদের বৈজ্ঞানিক নাম ল্যাটিন ভাষা অনুসারে যথাক্রমে malleus (hammer, H), incus (anvil, A) এবং stapes (stirrup, S)]। 17.9(a) চিত্রে মধ্যকর্ণ বড় ক'রে দেখানো হয়েছে, আর 17.9(b) চিত্রে কানের অন্যান্য অংশের সাপেক্ষে এরই পরিকল্প (schematic) রেখাচিত্র দেখানো হয়েছে। ক্ষুদ্রাস্থিগুলির ভর যথাক্রমে 0.023, 0.025 এবং 0.030 গ্রাম মাত্র।

চিত্র 17.9(a)—মধ্যকর্ণ

এই সমন্বয়টি কর্ণপটহ (D) থেকে ডিম্বাক্ষে (fenestra ovalis, O) অর্থাৎ বহিঃকর্ণ থেকে অন্তঃকর্ণে শাব্দস্পন্দন উত্তরিত (transmit) করে ; তাই করায় স্পন্দনবিস্তার কমে, শাব্দচাপ বাড়ে, কেননা অন্তঃকর্ণে চাপপ্রয়োগ সংকুচিত ক্ষেত্রফলের ওপর হয়। মধ্যকর্ণ কানের দুই প্রান্তীয় অংশের মধ্যে

শব্দবোধের মধ্যে সামঞ্জস্য রক্ষা করে—তাদের ভূমিকা কতকটা প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা-বর্তনীতে সামঞ্জস্যক ট্র্যান্স্‌ফর্মারের মতো। ডিম্বাক্ষটি অন্তঃকর্ণের গোড়াতেই ছোট্ট একটি ছিদ্র—রেকাবের পা-দানিটি তাকে ঢেকে রাখে।

চিত্র 17.9(b)—মধ্যকর্ণের পরিকল্প রেখাচিত্র

কর্ণপটহের দু'ধারে বায়ুচাপ সমান রাখতে কণ্ঠনালীটি (E) দিয়ে মধ্যকর্ণ গলার সঙ্গে যুক্ত থাকে। সাধারণত নলীটি চ্যাপ্টাই থাকে, তবে ঢোঁক গিলতে হলে বা হাই তুললে সেটি খুলে যায় এবং তখনই বায়ুচাপে সমতা প্রতিষ্ঠিত হয়। বিমানের ওঠা বা নামার সময় বায়ুচাপ দ্রুত বদ্‌লায়। তখন (বা সজোরে নাক ঝাড়লেও) অনেকসময় কানে তালা ধরে। কানের পর্দার দু'ধারে বায়ুর চাপবৈষম্যের জন্যেই এইরকম হয়। তখন জোরে হাই তুলে বা ঢোঁক গিলে সে অবস্থা কাটানো যায়। কণ্ঠনালীটি খোলা থাকলে, গলা বা নাক থেকে রোগবীজাণু এই পথে কানে চলে যেতেও পারে। তাই স্বাভাবিক অবস্থায় এটি বন্ধ থাকে।

প্রবল শব্দের বেলায় মধ্যকর্ণ রক্ষাকবচের কাজও করে। ক্ষুদ্রাস্থিগুলি এমনভাবে পেশীর সঙ্গে যুক্ত যে পর্দার প্রবল স্পন্দন হলে এদের স্পন্দনরীতিই পাল্‌টে যায়; তখন রেকাবের পা-দানিটি ডিম্বাক্ষের সমান্তরালে কাঁপতে থাকে।

চিত্র 17.10(a)—অন্তঃকর্ণের অঙ্গবিন্যাস

গ. **অন্তঃকর্ণ**: এটি একটি অস্থিবেষ্টিত গহ্বরবিশেষ; তার দুটি ভাগ — অর্ধবৃত্তাকার নালী (17.8a চিত্রে, Sc) আর শম্বুকী-নল (cochlea, Co)। শোনার ব্যাপারে প্রথমটির কোন ভূমিকাই নেই; তার কাজ আমাদের শরীরের ভারসাম্য বজায় আছে কিনা, সে চেতনা জাগানো।

শম্বুকী-নল (চিত্র 17.10): **গঠন**: এটি একটি অস্থিময় কুঠরি—

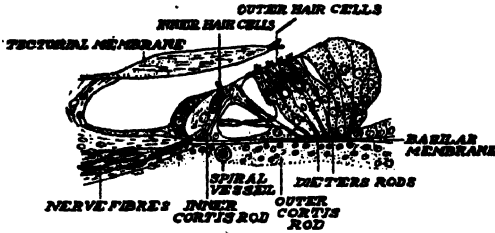
শামুকের খোলার মতো পাকানো, তাই এই নাম। এতে $2\frac{3}{4}$ পাক প্যাঁচ থাকে, মোট দৈর্ঘ্য প্রায় 35 সিমি এবং প্রস্থচ্ছেদ 4 বর্গ মিমি থেকে সরু হতে হতে 1 বর্গ মিমি-এ দাঁড়ায়। দৈর্ঘ্য বরাবর নলটি, ঊর্ধ্বকক্ষ (scala vestibuli, SV) এবং নিম্নকক্ষ (scala tympani, ST) এই দুই ভাগে বিভক্ত (চিত্র 17.8*c* এবং 17.10*a*) থাকে। শম্বুকী-নালীকে প্যাঁচ খুলে লম্বা ক'রে ফেলে, খাড়া তলে ছেদ, 17.10*b* চিত্রে দেখানো হয়েছে। মধ্যকর্ণের পা-দানি (S)-সংলগ্নে ডিম্বাক্ষ (O) থেকে ঊর্ধ্ব কক্ষ সুরু ; আর নিম্নকক্ষ শেষ হচ্ছে মধ্যকর্ণ-সংলগ্ন বৃত্তাক্ষে (round window, R বা fenestra rotunda)।

চিত্র 17.10(*b*)

দুই প্রান্তেই নলের মুখ চওড়া ; সেখান থেকে দুই কক্ষই সরু হতে হতে শীর্ণতম অংশে একটি ছোট ফুটো (helicotrema, HL) মারফতে যুক্ত। দুই কক্ষই **প্রান্তীয়-লসিকা** (perilymph) নামে জলের ভৌতধর্মী এক তরলে ভাঁত। দুই প্রান্তীয় গবাক্ষের এবং সংযোগী ফুটোর ক্ষেত্রফল যথাক্রমে 3, 2 এবং 0.15 বর্গ মিমি।

কর্ণপটহের স্পন্দন মধ্যকর্ণের ক্ষুদ্রাস্থিত্রয়ের মাধ্যমে এসে ডিম্বাক্ষের মারফতে ঊর্ধ্বকক্ষের তরলকে চাপ দিলে তা হেলিকোট্রেমার ছিদ্র দিয়ে নিম্নকক্ষের তরলে সঞ্চালিত হয় এবং শেষ পর্যন্ত বৃত্তাক্ষের ছদের ওপর গিয়ে পড়ে ; এইভাবেই কানের পর্দার স্পন্দন শম্বুকী-নলের তরলে ঢেউ তোলে। একটি ফাঁপা নালী (scala media, বা canal of cochlea, CD) দুই কক্ষকে আলাদা রাখে। তার ওপরদিকের প্রাচীরের নাম **Reissner ছদ** (RM), আর নীচের সীমাতল **ব্যাসিলার ছদ** (BM)। ব্যাসিলার ছদ অংশত অস্থিময়, অংশত থকথকে (gelatinous) থাকে। **মধ্যবর্তী নালীতে** (scala media) **মধ্যলসিকা** (endolymph) নামে এক তরল থাকে। ব্যাসিলার ছদের সঙ্গে শম্বুকী-নলের স্নায়ুতন্ত্র যুক্ত ; ছদটি মধ্যকর্ণের দিকে সবচেয়ে সরু (0.04 মিমি) আর বিপরীত প্রান্তে সবচেয়ে চওড়া (0.52 মিমি), অর্থাৎ এর এবং শম্বুকী-নালীর সংকীরণ (tapering) বিপরীতমুখী।

17.11 চিত্রে ব্যাসিলার ছদ এবং তৎসংলগ্ন অন্যান্য প্রত্যঙ্গগুলি দেখানো

হয়েছে। এই ছদে যেসব অনুপ্রস্থ তন্তুগুলি থাকে তারা ছদের সামর্থ্য যোগায়। এর সরু প্রান্তের দিকে ছদটি বেশ টান্‌টান্‌ থাকে। **সর্পিল সন্ধিবন্ধনী** (spiral ligaments) ছদের থকৃথকে অংশটিকে শম্বুকী-নলের গায়ে আট্‌কে রাখে। এই সান্ধিবন্ধনীর তন্তুগুলির দৈর্ঘ্য এবং টান শম্বুকী-নলের এক প্রান্ত

চিত্র 17.11—ব্যাসিলার ছদ-সংলগ্ন অঙ্গরাজি

থেকে অপর প্রান্ত পর্যন্ত ক্রমেই বদ্‌লাতে থাকে। ব্যাসিলার ছদের ওপরে, মধ্যনালীর মধ্যে উঠে থাকে **কর্টির (Corti's) প্রত্যঙ্গ** বা দণ্ড—এইখানেই শব্দজাত স্পন্দন শেষ পর্যন্ত স্নায়ুতে বৈদ্যুতিক স্পন্দন জাগায়। এই প্রত্যঙ্গ থেকে প্রায় ২৫,০০০ **রোমকোষ** (hair calls) মধ্যলসিকায় ঘাসের মতো জেগে রয়েছে—এরাই আসলে স্নায়ুপ্রান্তরাজি। তাদের ওপর দিয়ে হাল্‌কা আচ্ছাদনের মতো আর-একটি ছদ, tectorial membrane ; তার একটি প্রান্ত শম্বুকী-নলের হাড়ের তাকে (shelf) আট্‌কানো, অপর প্রান্ত মুক্ত।

ক্রিয়া : শব্দ পড়লে কানের পর্দা কাঁপে। ফলে, মধ্যকর্ণের শেষ ক্ষুদ্রাস্থি পা-দানি (S) এবং ডিম্বাক্ষ (O) মারফতে প্রান্তীয় লসিকায় ঢেউ ওঠে। সেই স্পন্দন **রিস্‌নার ছদের** মধ্যস্থতায় মধ্যলসিকায় পৌঁছয় এবং ব্যাসিলার ছদে মাত্র 10^{-10} সেমি (আণবিক ব্যাসের শতাংশমতো) বিস্তারের কম্পন ঘটায়। সংলগ্ন রোমকোষগুলির ওঠা-নামায় টেক্‌টোরিয়াল ছদের গায়ে চাপভেদ উৎপন্ন হয় ; ফলে, স্নায়ুপ্রান্তরাজি উত্তেজিত হয়। স্নায়ুসংকেত **শাব্দস্নায়ু** ধ'রে মস্তিষ্কে চলে যায়। এই সংকেত কিন্তু, অতি ক্ষীণ পরিবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা। সেখানে পৌঁছে এই বিদ্যুৎ-ধারা কেমন ক'রে শোনার অনুভূতি জাগায় তা এখনও আমরা সঠিকভাবে বুঝি না।

১৭-৫. শ্রবণপ্রক্রিয়া :

কর্ণকুহর ধ'রে শব্দতরঙ্গ এসে কর্ণপটহকে কাঁপায় ; সেই স্পন্দন যে মধ্যকর্ণের কোমলাস্থি-বাহিত হয়ে অন্তঃকর্ণের ব্যাসিলার ছদে স্পন্দন এবং প্রান্তীয়

ও মধ্যলসিকায় ঢেউ তোলে, সে কথা সহজবোধ্য। কিন্তু এই স্পন্দন কি-ভাবে যে স্নায়বিক শক্তিতে পরিণত হয়, তা কিন্তু দুর্বোধ্য। নানা জনে এ বিষয়ে নানা তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা দিয়েছেন, কিন্তু কোনটিই সর্বজনগ্রাহ্য হয়নি। যেকোন তত্ত্বেই নিচের ঘটনাগুলির পরিষ্কার ব্যাখ্যা চাই—(১) কান যেকোন জটিল শব্দকেই সরল দোলনে বিশ্লেষণ করতে পারে ; (২) কোন বাদ্যযন্ত্রে উৎপন্ন বাজনাতে কি কি সুর আছে তা সঙ্গীতজ্ঞ সহজেই বলতে পারেন ; (৩) বিস্তীর্ণ পাল্লায় তীব্রতা ও কম্পাংকে কান সাড়া দেয় ; (৪) দুই কানে শব্দ শুনে উৎসের দিক্ সন্ধান করা যায়, ইত্যাদি। এ বিষয়ে কতকগুলি প্রাসঙ্গিক ঘটনা মনে রাখা চাই—(ক) কর্ণকুহরকে এক-মুখ-বন্ধ বায়ুনল হিসেবে ধরলে, তার স্বভাবী কম্পাংক সেকেণ্ডে প্রায় 2700 এবং এই কম্পাংকেই কান সবচেয়ে সুবেদী ; (খ) কম্পাংকভেদে কানের সাড়ার যে বক্র (চিত্র 17.14) মেলে, তার আকার থেকে মনে হয় যে শ্রবণপ্রক্রিয়া, হয় বহু অনুনাদী, নয় বিশেষভাবে দমিত, কিম্বা দুই-ই (কর্টির অনুনাদকগুলিতে দেখা গেছে যে, 500 থেকে 1500 চক্রের কম্পাংক-পাল্লায় বিস্তার-হ্রাসের লগারিদম্ $\Delta = 0.12$ মতো হয়) ; (গ) মধ্যকর্ণের তরুণাস্থিগুলি কর্ণপটহ থেকে অন্তঃকর্ণে স্পন্দন-স্থানান্তরে সরণবিস্তার কমিয়ে চাপবিস্তার বাড়ায়, ফলে স্বনোত্তর বা অবস্বন কম্পাংক আটকে যায়।

ওহ্ম-এর সূত্র : কম্পাংকভেদ সম্বন্ধে কানের বোধক্ষমতা (frequency discrimination) খুবই সূক্ষ্ম। সে অতি স্বাভাবিকভাবে জটিল শব্দের ফুরিয়ার বিশ্লেষণ করতে পারে। এই ক্ষমতাকে ওহ্‌ম একটি সূত্রের আকারে প্রকাশ করেছেন (১৮৪৩)—

বায়ুতে স্বনকম্পাংকে সরল দোলন হলে, কানে একটিমাত্র সুরের উদ্দীপন হয় ; জটিল শব্দমাত্রকেই কান বিভিন্ন সুরে বিশ্লেষণ ক'রে নিতে পারে।

কোন স্বরে কান যতগুলি আংঙ্গিক সুর পায়, তাদের সংখ্যা ও আপেক্ষিক বিস্তারের ওপরেই স্বরের স্বনজাতির অনুভূতি নির্ভর করে। আঙ্গিক সুরগুলি অসমঞ্জস স্পন্দনজনিত হলে এবং স্বনপাল্লার মধ্যে বিশৃঙ্খলভাবে ছড়িয়ে থাকলে আমাদের অপস্বরের (noise) অনুভূতি হয়। স্বনগ্রাহ্য সাধারণ প্রাবল্যের ক্ষেত্রে, ভৌত ও শারীরতত্ত্বের বিচারে এই সূত্রটি গ্রহণযোগ্য। কিন্তু কোন কোন ক্ষেত্রে, যথা খুব জোরালো শব্দের বেলায়, এই সূত্র খাটে না। সেইসব ক্ষেত্রে অনুভূত শব্দের উৎপত্তি মনস্তাত্ত্বিক ব'লে ধরা যায়—কানের ভেতরে পর্দার অসমঞ্জস স্পন্দনের জন্যই এদের উৎপত্তি হয়।

শ্রবণপ্রক্রিয়ার সবচেয়ে জটিল ও দুরূহ অংশটি ঘটে অন্তঃকর্ণে, শম্বুকী-নালী এবং ব্যাসিলার ছদে ; সেখানেই স্পন্দনশক্তি থেকে শ্রবণানুভূতির জন্য প্রয়োজনীয় সব পরিবর্তনগুলি হয়। শ্রবণপ্রক্রিয়ার তাত্ত্বিক ব্যাখ্যাগুলি সবই এই ক্রিয়াপরম্পরা সম্পর্কে। নানা ব্যাখ্যার মধ্যে হেল্ম্‌হোল্‌ৎজ-এর ব্যাখ্যা অনেক পুরোনো হলেও যথেষ্ট সফল।

হেল্ম্‌হোল্‌ৎজ-এর অনুনাদী তত্ত্ব : এই ব্যাখ্যায় ধরে নেওয়া হয়েছে যে, (ক) ব্যাসিলার ছদের গঠন তন্তুময় ; (খ) তন্তুগুলির স্পন্দন পরস্পর নিরপেক্ষ ; (গ) তারা পিয়ানোর তারের মতো শম্বুকী-নালীর বেধ বরাবর স-টান ভাবে থাকে ; (ঘ) এদের দৈর্ঘ্য ও টান আলাদা আলাদা ব'লে প্রত্যেকেই ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে মেলবন্ধ (tuned) এবং তারাই অনুনাদকের কাজ করে। মধ্যকর্ণের রেকাব বা বপাদানীর স্পন্দন ডিম্বাক্ষ মারফৎ প্রথমে প্রান্তীয়-লসিকায় ও পরে মধ্যলসিকায় ঢেউ তোলে—ব্যাসিলার তন্তুগুলির তখন পরবশ কম্পন হয়। এই কম্পন কর্টির রড্‌গুলি দিয়ে স্নায়ুপ্রান্তগুলিতে সঞ্চালিত হয়। এই তন্তুগুলির গঠন এমন যে, তারা অতি দ্রুত গতিশীল হয়, আর দমন এমন যে, উদ্দীপন থামলেই স্পন্দনও সঙ্গে সঙ্গে থেমে যায়।

কানে একটি মাত্র সুর পড়লে ব্যাসিলার ছদে একটিমাত্র তন্তু কাঁপবে, আর মস্তিষ্কে একটি মাত্র অনুভূতি হবে ; সরলতর বিশ্লেষণ সম্ভব নয়। ভিন্ন ভিন্ন সুর কানে পড়লে প্রতিটি সুর তদনুসারী তন্তুকে উত্তেজিত করবে এবং যথাযথ স্নায়ুবাহিত হয়ে মস্তিষ্কে সাড়া জাগাবে। এইভাবেই কম্পাংকে ভেদবোধ জন্মায়। মিশ্র স্বর কানে পড়লে আঙ্গিক সুরগুলির কম্পাংকে মেলবন্ধ তন্তুগুলিতে আলাদা আলাদা ভাবে অনুনাদী স্পন্দন হয় ; ভিন্ন ভিন্ন স্নায়ুবাহিত স্পন্দনের মস্তিষ্কে আংশিক মিশ্রণ হওয়ায়, এক নির্দিষ্ট স্বনজাতির চেতনা জাগবে, কিন্তু মিশ্রণ আংশিক হওয়ায় প্রতিটি অঙ্গসুরই আলাদা আলাদা ভাবে বোঝা যাবে। এইভাবেই কানে ওহ্‌ম-এর সুরানুযায়ী স্বরবিশ্লেষণ ঘটে।

কাছাকাছি প্রাবল্যের দুটি সুর কানে পড়লে কয়েকটি স্পন্দক দুটো সুরেই সাড়া দেবে, কিন্তু স্বরকম্পের দরুন তাদের স্পন্দন হবে সবিরাম। স্বরকম্প শ্লথগতি হলে দুই ক্রমিক চরমশব্দপ্রাবল্যের মধ্যে স্পন্দকগুলি থেমে যায় ; দ্রুতগতি হলে তারা থামার সময় পায় না, কাজেই উদ্দীপনপ্রভাবমুক্ত হতে পারে না। এইভাবেই সুরসঙ্গতি (concord) এবং সুরবিরোধ (dis-cord) ঘটে।

সমালোচনা : হেল্ম্‌হোল্‌ৎজ-এর ব্যাখ্যা সর্বগ্রাহ্য হয়নি, কারণ—

(১) সমগ্র স্বনপাল্লার আলাদা আলাদা সাড়া দিতে যতগুলি তন্তু দরকার, ব্যাসিলার ছদে ততগুলি থাকার জায়গা নেই ; (২) অণুবীক্ষণ-যন্ত্র ব্যাসিলার ছদে তন্তুর কোন অস্তিত্ব খুঁজে পায়নি—ছদের গঠন আঠালো (gelatinous) ব'লে প্রমাণিত হয়েছে ; (৩) ছদকে সূক্ষ্মভাবে লম্বালম্বি চিরে দেখা গেছে যে, তার গঠন স-টান ঝিল্লীর মতো নয় ; (৪) গঠন বা গড়নের (shape) জন্য তার অনুনাদ হয় ব'লে মনে হয় না, হয় তার ভরবণ্টন, দার্ঢ্য, দৈর্ঘ্য, প্রস্থ, বেধের মাপ প্রভৃতির জন্য।

সমর্থন : কিছু কিছু অদলবদল ক'রে নিলে এই তত্ত্ব এখনও গ্রাহ্য, কেননা পরীক্ষালব্ধ অধিকাংশ ঘটনার ব্যাখ্যাই এই তত্ত্ব থেকে মেলে। নিচে এর পরোক্ষ সমর্থনে কয়েকটি ব্যাপার বলা হচ্ছে :—

ক. **অনুভূতিসাপেক্ষ যুগ্ম-স্বন :** আমরা দেখেছি যে, দুই শব্দের ক্রিয়ায় এমন স্বরের উৎপত্তি সম্ভব, বাইরের বায়ুতে যার স্পন্দন নেই—যেমন অনুপস্থিত মূলস্বর এবং শ্রুতি সমমেল (§ ১১-৭)। এই ঘটনা ওহ্‌ম-সূত্র লঙ্ঘন করে। কিন্তু ভাইজম্যান-এর গবেষণা (§ ১১-৮) থেকে পাওয়া গেছে যে, অপ্রতিসমভাবে ভারাক্রান্ত ছদে দুটি স্পন্দন একসঙ্গে আরোপিত হলে উদ্দীপিত স্পন্দনে তারা ছাড়া, অন্য কম্পাংকের স্পন্দনও আসে। কানের পর্দাও মধ্যকর্ণের অস্থিগুলির ভারে অপ্রতিসমভাবে স্পন্দিত হয় ব'লেই অনুভূতিসাপেক্ষ যুগ্ম-স্বন শোনা সম্ভব ; বায়ুতে কিন্তু তার অস্তিত্ব নেই।

খ. **ব্যাসিলার অনুনাদক :** এখানে ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে দমন ও সংবেদিতার বৈশিষ্ট্য, বহু অনুনাদকবিশিষ্ট স্পন্দকের মতোই।

গ. **নির্দিষ্ট প্রাবল্য এবং কম্পাংক-সীমা :** ব্যাসিলার ছদের ভিন্ন ভিন্ন অংশকে ভিন্ন ভিন্ন মেলবন্ধ অনুনাদক ব'লেই নির্দেশ করা যায়।

ঘ. কোন নির্দিষ্ট কম্পাংকের জোরালো শব্দের অবিরাম ক্রিয়ায় নির্দিষ্ট তীক্ষ্ণতায় (যেমন কতকগুলি স্বরবর্ণে) বধিরত্ব ঘটতে দেখা গেছে। ব্যাসিলার ছদের তদনুযায়ী অংশের সাময়িক বা স্থায়ী ক্ষতি হলেই তা হতে পারে।

ঙ. **বিস্তীর্ণ কম্পাংকপাল্লায় সাড়া দিতে তন্তুসংখ্যার অপ্রতুলতা** সম্বন্ধে উইলকিন্‌সন বলেছেন যে, একটি সুরে ছদের ছোট একটি অংশ উত্তেজিত হয়, কিন্তু তার যে প্রস্থচ্ছেদের কম্পনাংক ঠিক অনুনাদী সেখানেই চরম বিস্তারে কম্পন হবে ; চরম উদ্দীপনের দুই বিন্দু কত কাছে হলে মস্তিষ্ক তাদের আলাদা ব'লে ধরতে পারবে তার ওপরেই কানের তীক্ষ্ণতা-বেদিতা (pitch-sensitivity) নির্ভর করবে। স্বরগ্রামের ভিন্ন ভিন্ন

অংশে মস্তিষ্কের এই বিভেদ-অনুভূতি নিশ্চয়ই আলাদা হতে পারে (আঙুলের মাথায় খুব কাছাকাছি দুটি ছুঁচ ফোটালে তাদের আলাদা ব'লে বোঝা যায়, কিন্তু কম অনুভূতির জায়গায়, যেমন পায়ের তলায়, ঐভাবে ফোটালে তাদের অভিন্ন ব'লে মনে হয়)। তাঁর মতে ছদের স্পন্দন বিশেষ সর্তশাসিত, তাকে পিয়ানোর তারের সঙ্গে তুলনা করা অসঙ্গত।

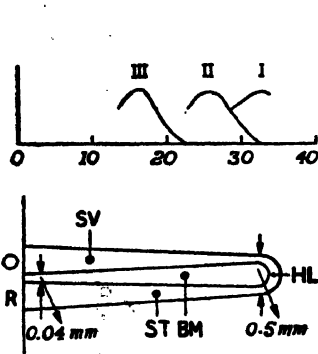
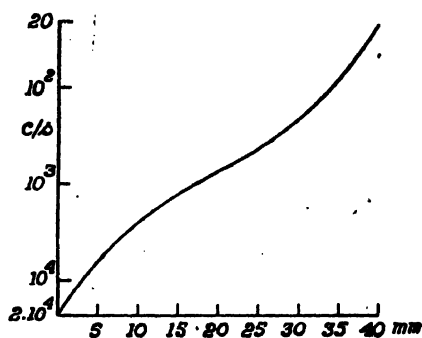
চ. ব্যাসিলার ছদের এক এক অংশে যে এক এক কম্পাংকে সাড়া দেয় তা ভিন্ন ভিন্ন জন্তুর মস্তিষ্কে শাব্দ-অনুভব-কেন্দ্রে পরীক্ষা চালিয়ে দেখা গেছে। কুকুর, বেরাল, গিনিপিগ প্রভৃতির শাব্দ-অনুভব অঞ্চলের ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় পিন ফুটিয়ে সেই সেই অংশকে অকেজো করে দিয়ে দেখা গেছে যে, কর্টির রড্‌গুলির তলার প্রান্ত উচ্চ কম্পাংকে আর ওপরের প্রান্ত নিম্ন কম্পাংকে সাড়া দেয়। এইসব পরীক্ষায় আরও প্রমাণ হয়েছে যে, তীক্ষ্ণতা-বেদিতা ব্যাসিলার ছদের ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় কেন্দ্রীভূত। অনুনাদ-তত্ত্বও তাই বলে।

ছ. অনুনাদ-তত্ত্ব এও বলে যে, সুরে হঠাৎ যদি দশাবৈপরীত্য ঘটানো যায় তাহলে শম্বুকী-নালীতে স্পন্দন ক্ষণিকের জন্য থেমে গিয়ে অপস্বরের উৎপত্তি ঘটাবে ; হার্ট্রিজ-এর পরীক্ষা এই সিদ্ধান্তকে সমর্থন করে।

শ্রবণপ্রক্রিয়ার আধুনিক ধারণা : কর্ণপটহের গঠন এমন যে, প্রবল অবস্বন শব্দে সে স্পন্দিত হয় না। স্বনকম্পাংকে তার স্পন্দন মধ্যকর্ণের তিনটি তরুণাস্থির মারফতে শম্বুকী-তরলে পৌঁছয়। তারা লেভার-নীতিতে স্পন্দিত হয় এবং প্রায় 1.2 গুণ যান্ত্রিক সুবিধা আনে। ডিম্বাক্ষের আর কানের পর্দার ক্ষেত্রফলের কার্যকর অনুপাত 1/20-র মতো। এই অনুপাত আর যান্ত্রিক সুবিধার কল্যাণে ডিম্বাক্ষে চাপবৃদ্ধি প্রায় ২৫ গুণ হয় ; তাতে কর্ণকুহরের বায়ুর স্পন্দন শম্বুকী-তরলে সঞ্চালিত হতে সুবিধা হয়। কেননা তরলের শাব্দ-বাধ বায়ুর তুলনায় অনেক বেশী হওয়ায় তাদের সামঞ্জস্যবিধান করা না হলে যথেষ্ট শক্তি-প্রতিফলনের সম্ভাবনা থাকে ; মধ্যকর্ণের কাজ এই সামঞ্জস্য আনা। কানের পর্দা, তিনটি তরুণাস্থি আর ডিম্বাক্ষের এইরকম ক্রিয়া বাধযোটক (impedance matching) ট্রান্সফর্মারের ক্রিয়ার অনুরূপ।

তারপর, ডিম্বাক্ষস্পন্দন শম্বুকী-তরলে যে ঢেউ তোলে তারা ব্যাসিলার ছদ ধ'রে এগোয়। এই তরঙ্গদলের ভিন্ন ভিন্ন অঙ্গতরঙ্গ ব্যাসিলার ছদের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে অনুনাদ জাগায় ; 17.12 চিত্রে যথাক্রমে 50 (I), 400 (II) এবং 1600 চক্রে (III) ব্যাসিলার ছদের বিভিন্ন বিন্দুতে স্পন্দনবিস্তার

দেখানো হয়েছে। এই এই কম্পাংকগুলি ছদের যে যে অংশের, ডিম্বাক্ষ থেকে সেই সেই অংশের দূরত্ব লেখচিত্রে মিমি-এ প্রকাশ করা হয়েছে ; ব্যাসিলার ছদটি 35 মিমি লম্বা। ডিম্বাক্ষের কাছাকাছি এই ছদ যেখানে সংকীর্ণতম, সেইখানেই উচ্চ কম্পাংকে সাড়া জাগে। বিভিন্ন অংশে ছদের প্রস্থভেদ তলার ছবিতে লক্ষ্য কর। 17.13 চিত্রে আপতিত ঐ ঐ কম্পাংকের শব্দের ক্রিয়ায় ব্যাসিলার ছদের অনুনাদস্থলগুলি দেখানো হয়েছে।

বেকেসির মতে, ব্যাসিলার ছদ এক প্রশস্ত-পাল্লা যান্ত্রিক ফিল্‌টারের কাজ করে ; এখানে মিশ্র শব্দগুলির আংশিক পৃথকীকরণ ঘটে এবং একটি নির্দিষ্ট

চিত্র 17.12 ব্যাসিলার ছদে অনুনাদ চিত্র 17.13

স্নায়ুদল কোন একটি বিশেষ কম্পাংকে অন্যান্য কম্পাংকের তুলনায় বেশী উত্তেজিত হয়। এই আলোচনা থেকে মনে হতে পারে যে, কান এক স্থূল কম্পাংক-বিশ্লেষক ; কিন্তু সে তা নয়। কার্যত কিন্তু, কানে মাত্র কয়েক চক্রের কম্পাংকভেদও ধরা পড়ে ; এই সূক্ষ্ম বিশ্লেষণ সম্ভবত সংশ্লিষ্ট স্নায়ুতন্ত্রে ও মস্তিষ্কে হয়ে থাকে।

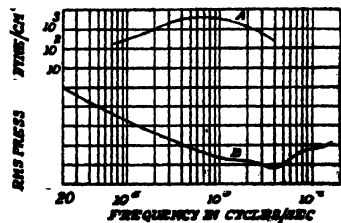
ব্যাসিলার ঝিল্লীতে প্রায় ২৫ হাজারের মতো কৈশিক কোষ আছে। এরা চাপ-বৈদ্যুতিক ধর্ম-সম্পন্ন, অর্থাৎ এদের ওপর চাপবৈষম্য ঘটলে বিভবভেদ দেখা দেয়। ব্যাসিলার ঝিল্লীর কোন অংশে স্পন্দন হলে সেই অংশের কেশগুলি টেক্‌টোরিয়াল ঝিল্লীর গায়ে পিষ্ট হওয়ায় শম্বুকী-নলে বিভবভেদ উৎপন্ন হয়। এই বিভবভেদ শ্রবণস্নায়ুতে বিদ্যুৎস্পন্দন ঘটায় এবং সেই স্পন্দন মস্তিষ্কে সঞ্চালিত হয়। কৈশিক কোষগুলি এইভাবেই ব্যাসিলার ছদের স্পন্দন-শৈলী শ্রবণস্নায়ুতন্ত্রে পৌঁছে দেয়।

শম্বুকী-বিভবভেদের উপস্থিতি প্রমাণ করতে উচ্চশক্তি ভাল্‌ভ্‌-বিবর্ধকের দুই নিবেশপ্রান্তিকের (input terminals) একটি, শম্বুকী-তরলে ডোবালে আর অপরটি মাথার সুবিধামতো মাংসল অংশে বসালেই সাড়া মেলে; কৈশিক কোষের অনুপস্থিতিতে এই বিভবভেদ থাকে না। পরীক্ষা ক'রে দেখা গেছে যে, উৎপন্ন শম্বুকী-বিভবভেদ আপতিত শব্দতরঙ্গের চাপভেদের প্রায় অবিকৃত অনুকৃতি; তা ছাড়া শম্বুকী-বিভবভেদ লাউড-স্পীকারে প্রয়োগ করলে কর্ণগ্রাহ্য শব্দের পুনরুৎপত্তি হয়।

১৭-৬. শ্রবণ-সীমান্ত (Thresholds of hearing):

আপতিত শব্দতরঙ্গের কম্পাংক এবং প্রাবল্য মোটামুটি একটা পাল্লার মধ্যে থাকলে তবেই শব্দের অনুভূতি হয়। শ্রোতাভেদে, এমন-কি একই মানুষের বয়সভেদে বা পারিপার্শ্বিক ও অভ্যাসভেদে এই পাল্লাগুলি অল্পবিস্তর বদ্‌লায়।

ক. কম্পাংকপাল্লার সীমান্ত: সাধারণভাবে ধরা হয় যে, মোটামুটি সেকেণ্ডে 20 থেকে 20 কিলোচক্র পর্যন্ত শ্রবণগ্রাহ্য কম্পাংকের সীমানা। তবে অনেকে যথেষ্ট জোরালো শব্দ 20 চক্রের কম কম্পাংকেও শুনতে পান। আবার শিশুরা ঊর্ধ্বসীমার ওপরে জোরালো শব্দ শুনতে পেতে পারে। বয়স বাড়লে সীমান্ত (threshold)-বিস্তার কমে। মাঝবয়সীরা সাধারণত 12 থেকে 16 কিলোহার্ৎ'জের ওপরে শুনতে পান না।

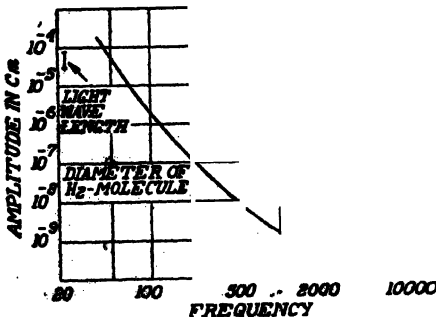
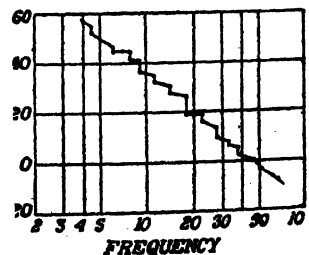
খ. প্রাবল্য-সীমান্ত: তরঙ্গের প্রাবল্য আবার নির্দিষ্ট পাল্লার বাইরে থাকলে এই কম্পাংকপাল্লাতেও শব্দ শোনা যায় না। কোন নির্দিষ্ট কম্পাংকে শ্রবণগ্রাহ্য প্রাবল্যের নিম্ন এবং ঊর্ধ্ব সীমানাকে যথাক্রমে শ্রবণ-সীমান্ত (threshold of audibility) এবং সহন-সীমান্ত (threshold of tolerance or feeling) বলে; দুই সীমান্ত-মাত্রাই কম্পাংকের সঙ্গে বদ্‌লাতে থাকে। 17.14 চিত্রে A এবং B যথাক্রমে সহন- ও শ্রবণ-সীমান্ত।

চিত্র 17.14—শ্রবণ-সীমারেখা

অপস্বর না থাকলে, কোন নির্দিষ্ট কম্পাংকের বিশুদ্ধ সুর যে সর্বনিম্ন শাব্দচাপে বা প্রাবল্যে শ্রুতিগোচর হয়, পরীক্ষা ক'রে তার মান নির্ধারিত হয়েছে। নির্দিষ্ট শ্রোতার ক্ষেত্রেও, তা সময় পারিপার্শ্বিক এবং মানসিকতা-

ভেদে পরিবর্তিত হয়। স্বভাবতই শ্রোতাভেদে এই মান বদলাবে। অপস্বরের উপস্থিতিতে প্রাবল্যের অবম মান বেড়ে যায়। তাই এই মান-নির্ণয়ে নানারকম সতর্কতা নেওয়া দরকার।

এই উদ্দেশ্যে তীক্ষ্ণশ্রবণ একজন শ্রোতাকে প্রতিধ্বনি-রহিত এক ঘরে স্বনক থেকে এক মিটার দূরে বসানো হয়। তারপর তাকে বেশ কিছুক্ষণ ধ'রে নীরবতায় অভ্যস্ত ক'রে নিয়ে একসঙ্গে দুই কানেই শোনার ব্যবস্থা করা হয়; আগে শ্রোতার মাথার মধ্যবিন্দু যেখানে থাকার কথা, সেই বিন্দুতে শাব্দচাপ মেপে নেওয়া থাকে [1000 চক্রের বিশুদ্ধ সুরের অবম কর্ণগ্রাহ্য শাব্দচাপের মান 2×10^{-4} ডাইন/বর্গ সেমি, ১৯৫ পৃষ্ঠায় উদাহরণ (২) দেখ]। এই প্রামাণ্য শাব্দচাপমাত্রার পরিপ্রেক্ষিতেই পরীক্ষাধীন শব্দের অবম বা শ্রবণ-সীমান্ত চাপমাত্রা প্রকাশ করা হয়।

17.15 চিত্রে শ্রবণসীমান্তমাত্রার সঙ্গে কম্পাংকের গড় সম্পর্করেখা দেখানো হয়েছে। প্রামাণ্য শাব্দচাপমাত্রায় কানের পর্দার স্পন্দনবিস্তার 10^{-9} সেমি মাত্র এবং 10^{-16} ওয়াট/সেমি^{2} তার তীব্রতা। এই তীব্রতাকেই শূন্য বা প্রান্তিক বা সীমান্ততীব্রতা ধরা হয়েছে। কিন্তু যে সর্বনিম্ন চাপে কানে সাড়া জাগে তা ঘটে 3500 চক্রে। তখন শাব্দচাপভেদ 8×10^{-5} ডাইন/সেমি^{2} এবং কানের পর্দার স্পন্দনবিস্তার 1.25×10^{-10} সেমি—হাইড্রোজেন অণুর ব্যাসের অনেক কম, আলোর তরঙ্গদৈর্ঘ্যের চেয়ে আরও অনেক কম (§17-4 দেখ)।

অনেক কম কম্পাংকে প্রাবল্যসীমান্তমাত্রা অনেক উঁচুতে—20 চক্রে শাব্দচাপভেদ প্রায় 1 ডাইন/সেমি। অবস্বন কম্পাংকে কর্ণগ্রাহ্য চাপভেদের পরিবর্তন আরও বেশী এবং তা ধাপে ধাপে (চিত্র 17.16) ঘটে। এই

চিত্র 17.15—কম্পাংক-ভেদে শ্রবণ-গ্রাহ্য সরণরেখা

চিত্র 17.16—নিম্ন কম্পাংকে শ্রবণ-গ্রাহ্য তীব্রতা-মাত্রা

ঘটনা শ্রবণপ্রক্রিয়াতেও কোয়াণ্টাম বা কণা-প্রকৃতির অস্তিত্ব নির্দেশ করে। বয়সভেদে শ্রবণ-সীমানা বদ্‌লাতে থাকে, বয়স বাড়লে সীমান্ত-মানও বাড়ে এবং আশ্চর্যের বিষয়, এই বাড়ার মান স্ত্রীলোকের তুলনায় পুরুষের ক্ষেত্রে বেশী। শ্রবণসীমারেখা খুবই সংবেদনশীল, কম্পাংক ছাড়াও অনেক কিছুর ওপর নির্ভর করে।

আবার কম্পাংক স্থির রেখে তীব্রতা বাড়াতে থাকলে এমন পর্যায়ে পৌঁছনো যায় যে, তখন শব্দ আর শ্রবণ-গ্রাহ্য থাকে না, কানে অস্বস্তি, ব্যথা বা সুড়সুড়ি লাগে। তীব্রতার এই ঊর্ধ্বসীমাকে সহন বা অনুভূতি-সীমান্ত (17.14 চিত্রে A রেখা) বলে। তবে এই সীমান্তরেখাটি অনেকটাই কম্পাংক-নিরপেক্ষ। মোটামুটিভাবে 1000 চক্র কম্পাংকে দুই সীমানার মধ্যে শাব্দ-চাপবিস্তারের অনুপাত $10^7 : 1$, অর্থাৎ তীব্রতান্তরের অনুপাত $10^{14} : 1$—মানুষের তৈরী যেকোন যন্ত্রের আয়ত্তের বাইরে।

১৭-৭. তীব্রতার মাপ : বেল ও ডেসিবেল :

প্রাবল্যসীমান্তভেদের আলোচনা থেকে দেখা গেল যে, মোটামুটিভাবে যে চাপভেদকে শব্দ ব'লে কান স্বীকার করে তাদের অনুপাত $10^7 : 1$, অর্থাৎ শাব্দতীব্রতার পাল্লার অনুপাত $10^{14} : 1$ মাত্রা জুড়ে থাকে। সর্বোচ্চ এবং সর্বনিম্ন তীব্রতার লগারিদ্‌মের অনুপাত তাহলে $14 : 1$ হবে; সুতরাং আপেক্ষিক তীব্রতা (I/I_0) লগারিদ্‌মে প্রকাশ করলে মাপন-পাল্লা ছোট (0—14) এবং সহজে আয়ত্তাধীনে আসে। শাব্দ-তীব্রতা এবং প্রাবল্য-অনুভূতি **লগারিদ্‌ম্ সম্পর্ক** মেনে চলে।

বেল এবং **ডেসিবেল** আপেক্ষিক তীব্রতার লগারিদ্‌ম্-সম্পর্কিত একক। দুই শাব্দ-তীব্রতার অনুপাত $10 : 1$ হলে, তাদের তীব্রতার তফাৎ এক বেল ধরা হয়, অর্থাৎ তীব্রতা 10 গুণ বাড়লে, সেই বৃদ্ধিকে এক বেল ধরা হয় (টেলিফোনের আবিষ্কর্তা Graham Bell-এর নামে 'bel' এককটি চালু হয়েছে)। বর্তমানে বহুল-প্রচলিত শাব্দতীব্রতার একক—ডেসিবেল (db), বেল-এর এক-দশমাংশ। দুই তীব্রতার মধ্যে 1 db তফাৎ থাকলে জোরালো তীব্রতা দুর্বল তীব্রতার $(10)^{0 \cdot 1}$ বা 1.26 গুণ হবে।

1000 হার্ৎজ কম্পাংকে যে তীব্রতা, প্রতি বর্গ সেমি স্থানে 10^{-16} ওয়াট ক্ষমতা প্রয়োগ করে (অর্থাৎ সেকেণ্ডে 10^{-16} জুল শক্তি ঐ এলাকা অতিক্রম ক'রে যায়), তাকে প্রামাণ্য তথা শূন্য তীব্রতা (zero db-level) বলে। ঐ

কম্পাংকে ঐ তীব্রতাই কর্ণগ্রাহ্য অবম তীব্রতা, আর সেই অবস্থায় এক ডেসিবেল তীব্রতাভেদ হলেই তবে কানে সেই ভেদ ধরা পড়ে—তার কম তীব্রতাভেদ কর্ণগ্রাহ্য নয়। শূন্য-তীব্রতা-স্তরে শাব্দচাপের মান 20°C উষ্ণতায় প্রতি বর্গ সেমিতে 0·0002 ডাইন মাত্র (১৯৫ পৃষ্ঠার উদাহরণ ২ দেখ)।

তীব্রতা, প্রাবল্য এবং কম্পাংকের মধ্যে সম্পর্ক : যে অনুভূতি দিয়ে দুর্বল থেকে প্রবল ক্রমানুসারে শব্দ সাজানো যায়, তাকে **শাব্দ-প্রাবল্য** বলে। এই অনুভূতি মস্তিষ্কের বিচারসাপেক্ষ, সুতরাং তার নির্ভুল ভৌত মাপজোখ সম্ভব নয়। **তীব্রতা এবং প্রাবল্যের মধ্যে সম্পর্ক নিকট—মোটামুটিভাবে প্রথমটি কারণ, দ্বিতীয়টি তার ফল, তারা আনুপাতিকও নয়, সমার্থক তো নয়ই।** প্রাবল্যের অনুভূতি আবার কম্পাংক-নির্ভরও বটে। দুই সমতীব্রতার শব্দে কম্পাংক বেশী হলেই, তাদের দরুন প্রাবল্যের অনুভূতিতে তফাৎ ধরা পড়ে, কম কম্পাংকে নয়; যেমন 1000 হার্ৎজ কম্পাংকে 20 ডেসিবেল তীব্রতাভেদ সহজেই টের পাওয়া যায়, কিন্তু এই তীব্রতাভেদ 100 হার্ৎজ কম্পাংকে ধরাই যায় না। সাধারণভাবে বলা যায় যে, **তীব্রতা বাড়লে প্রাবল্যের অনুভূতি বাড়ে।**

50 ডেসিবেলের বেশী তীব্রতায় 50 হার্ৎজ থেকে 10 কিলোহার্ৎজ কম্পাংকপাল্লায় 1 ডেসিবেল তীব্রতাভেদ পর্যন্ত কানে ধরা পড়ে। তীব্রতা 50-এর কম হলে অবম কর্ণগ্রাহ্য তীব্রতাভেদের মান বাড়তে বাড়তে 3 ডেসিবেল পর্যন্ত হতে পারে। আবার যে অবম কম্পাংকভেদ কানে ধরা পড়ে তার মানও তীব্রতান্তর এবং কম্পাংকের ওপর নির্ভর করে—যেমন 1000 হার্ৎজের বেশী কম্পাংকে এবং 40 ডেসিবেলের বেশী তীব্রতায় 0.3% কম্পাংকভেদ কানে ধরা পড়ে; অথচ ঐ তীব্রতাতেই 3500 হার্ৎজে কম্পাংকের মাত্র 3 হার্ৎজ তফাৎ, কানে ধরা যায়। কিন্তু কম তীব্রতা ও কম্পাংকে, কম্পাংকভেদ অনেক বেশী না হলে বোঝাই যায় না।

ওয়েবার-ফেক্‌নার সূত্র : আমরা বলেছি যে শব্দের অনুভূতির ব্যাপারে, তীব্রতা কারণ তথা উদ্দীপক, আর প্রাবল্য তার ফল তথা উদ্ভূত অনুভূতি। স্নায়ুর উদ্দীপন ও উদ্ভূত অনুভূতির মধ্যে এক সম্পর্ক, বিজ্ঞানী ওয়েবার বার করেন। তিনি পর্যবেক্ষকের হাতে ওজন চাপিয়ে চাপিয়ে দীর্ঘকাল পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালিয়ে এই সিদ্ধান্তে পৌঁছন যে—

কোন অনুভূতির (E) অবমগ্রাহ্য বৃদ্ধি যদি δE হয়, আর এই বৃদ্ধি ঘটাতে

উদ্দীপনের মাপ S থেকে বেড়ে যদি $S+\delta S$ হয়, তাহলে তাদের মধ্যে সম্পর্ক হবে

$$\delta E \propto \frac{\delta S}{S} \quad \text{বা} \quad \delta E = K\frac{\delta S}{S} \qquad (১৭\text{-}৬.১)$$

$$\therefore \quad E = K' \log S \qquad (১৭\text{-}৬.২)$$

অর্থাৎ অনুভূতির মান উদ্দীপনের লগারিদ্‌মের সমানুপাতী। এই সূত্রের ভিত্তিতেই বেল ও ডেসিবেল নির্ধারিত হয়েছে। ওয়েবার-এর এই সূত্রটি ফেক্‌নার শব্দের ক্ষেত্রে প্রয়োগ করেন।

শাব্দ-তীব্রতা-স্তর: কোন শব্দের তীব্রতা-স্তর (I.L.) বলতে প্রামাণ্য তীব্রতার (I_0) সাপেক্ষে তার তীব্রতা যতগুণ (I/I_0), তার লগারিদ্‌মকে ধরা হয় এবং তাকে বেল-এ প্রকাশ করা হয়, অর্থাৎ

$$\text{I. L.}\ (bels) = \log_{10} I/I_0. \qquad (১৭\text{-}৬.৩)$$

এবং
$$\text{I. L.}\ (db) = 10 \log_{10} I/I_0 \qquad (১৭\text{-}৬.৪)$$
$$= 10 \log_{10} I/10^{-16}\ \text{watts/cm}^2$$

অধুনা ব্যবহৃত অধিকাংশ শব্দগ্রাহকই শাব্দচাপভেদে সাড়া দেয়, শাব্দতীব্রতা-ভেদে নয়। তীব্রতা শাব্দচাপের বর্গানুপাতী, সুতরাং ১৭-৬.৪ সম্পর্কের জায়গায় লিখতে পারি

$$\text{I.L.}\ (decibels) = 10 \log_{10} (p/p_0)^2$$
$$= 20 \log_{10} (p/p_0) \qquad (১৭\text{-}৬.৫)$$

অর্থাৎ কোন শব্দের কার্যকরী শাব্দচাপ (I) এবং প্রামাণ্য শাব্দচাপের (I_0) অনুপাতের 10-ভিত্তিক লগারিদ্‌মকে 20 দিয়ে গুণ করলে সেই শব্দের শাব্দচাপস্তর (SPL) মেলে। এক্ষেত্রে প্রতি বর্গ সেমি ক্ষেত্রে 204 মাইক্রো-ডাইন *rms* চাপকে প্রামাণ্য চাপ বা চাপস্তরের শূন্যমান ধরা হয়েছে।

$$\therefore \quad \text{SPL}_{(db)} = 20 \log_{10} \frac{p_{rms}}{204 \times 10^{-6}\ \text{dynes/cm}^2} \qquad (১৭\text{-}৬.৬)$$

তীব্রতা-স্তর ও শাব্দচাপ-স্তরের মধ্যে সম্পর্ক: আমরা জানি যে,

$I = p^2_{rms}/\rho_0 c$, অর্থাৎ তীব্রতা-স্তর

$$\text{I.L. } (db) = 10 \log_{10} I/I_0 = 10 \log_{10} \frac{p^2_{rms}/\rho_0 c}{I_0}$$

$$= 20 \log_{10} p_{rms} - 10 \log_{10} c\rho_0 I_0$$

কিন্তু ১৭-৬.৫ অনুযায়ী, $\text{I.L. } (db) = 20 (\log_{10} p_{rms} - \log_{10} p_0)$

$$\therefore \quad \text{I.L.} = \text{SPL} + 10(\log_{10} p_0{}^2 - \log_{10} c\rho_0 I_0)$$

$$= \text{SPL} + 10 \log_{10}(p_0{}^2/c\rho_0 I_0)$$

$$= \text{SPL} + 10 \log_{10} 40/\rho_0 c \qquad (১৭\text{-}৬.৭)$$

কেননা $p_0 = 2 \times 10^{-4}$ ডাইন/(সেমি)^2

এবং $I_0 = 10^{-16}$ ওয়াট/(সেমি)$^2 = 10^{-9}$ আর্গ/সেমি^{2}/সে

I_0 সাপেক্ষে দুই শাব্দ-তীব্রতা I_1 এবং I_2-এর তীব্রতা-স্তর যদি m এবং n ডেসিবেল হয়, তাহলে মিলিত তীব্রতা-স্তর $(m+n)$ ডেসিবেল হবে না, হবে $10 \log_{10} (10^{0 \cdot 1m} + 10^{0 \cdot 1n})$ ডেসিবেল-এর সমান ; $m = n$ হলে, দুই শব্দের উপরিপাতনে তীব্রতাবৃদ্ধি 3 db মতো হবে।

উদাহরণ : (১) শ্রবণ-সীমান্ত যদি প্রতি বর্গ সেমি-এ, 10^{-10} মাইক্রোওয়াট হয় এবং যন্ত্রসঙ্গীতের আসরে তীব্রতা-স্তর 100 ডেসিবেল হয়, তাহলে শাব্দ-তীব্রতা কত ?

সমাধান : তীব্রতা-স্তর 100 ডেসিবেল = 10 বেল। তাহলে

$I/I_0 = 10^{10}$; $I_0 = 10^{-10}\ \mu\text{W/cm}^2$

$$\therefore \quad I = 10^{10} \times I_0 = 1\ \mu\text{W/cm}^2$$

(২) কোন স্বনকের শব্দ-উৎপাদন-ক্ষমতা $\frac{1}{2}$ ওয়াট হলে, 10 মিটার দূরে তীব্রতা-স্তর কত ?

সমাধান : 0.5 ওয়াট শক্তি গোলকীয় তরঙ্গ-তলের ওপর সমান হারে ছড়িয়ে থাকবে। কাজেই 10 মি দূরে শক্তির তলমাত্রিক ঘনত্ব হবে $(0.5/4\pi \times 10^6)$ ওয়াট/সেমি^{2}।

$$\therefore \quad \text{তীব্রতা-স্তর} = 10 \log_{10} \frac{\frac{1}{2}/4\pi \times 10^6}{10^{-16}}$$

$$= 10 \log_{10} \frac{0.5}{4\pi \times 10^{-10}} = 86 \text{ ডেসিবেল}$$

(৩) সাধারণ কথোপকথনে তীব্রতা-স্তর প্রমাণ-স্তরের $70\ db$ ওপরে থাকলে, শাব্দতীব্রতা এবং শাব্দচাপভেদ কত কত ?

সমাধান : তীব্রতা-স্তর $= 10 \log_{10} I/I_0$ ডেসিবেল

$\therefore \quad 70 = 10 \log_{10} (I/10^{-16})$ ওয়াট/সেমি²

$\therefore \quad I = 10^7 \times 10^{-16}$ ওয়াট/সেমি² $= 10^{-9}$ ওয়াট/সেমি²

আবার তীব্রতা-স্তর $= 20 \log_{10}(p/p_0)$ ডেসিবেল

$\therefore \quad 70 = 20 \log_{10} [\ (p/2 \times 10^4$ ডাইন/সেমি²$)\ ]$

$\therefore \quad p = 10^{3.5} \times 2 \times 10^{-4} = 2/\sqrt{10} = 0.632$ ডাইন/সেমি²

ওয়েবার-সূত্রের আলোচনা : ওয়েবার পরীক্ষা-নিরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত করেছিলেন যে, W ভারের ওপর যতখানি ন্যূনতম ভার বাড়ালে ওজন যে বেড়েছে সেই অনুভূতিটুকু হয়, সেই ওজন ΔW, আর অবম ইন্দ্রিয়গ্রাহ্য অনুভূতিবৃদ্ধি ΔS হলে, তাদের মধ্যে সম্পর্ক হবে

$$\Delta S = K(\Delta W/W)$$

ফেক্‌নার ΔS এবং ΔW-কে পূর্ণ অবকলক (complete differential) ধ'রে নিয়ে সমাকলন ক'রে ১৭-৬.২ সমীকরণে পৌঁছেছিলেন।

তবে আলো বা শব্দের অনুভূতি এই সূত্র সঠিকভাবে মেনে চলে না। ন্যাডসেন-এর মতে, শাব্দ-অনুভূতি

$$\delta I/I = F + (1-F)(I_0/I_n)^n \qquad (১৭\text{-}৬.৩)$$

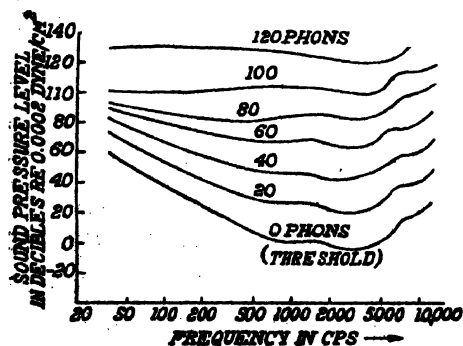
পরীক্ষায় সমর্থিত এই সম্পর্কটি মেনে চলে। এখানে অনুভূতিগ্রাহ্য ন্যূনতম তীব্রতা-বৃদ্ধি δI, যখন উচ্চমানের তীব্রতা I এবং তাদের অনুপাতের সীমান্ত-(limiting) মান F, এবং n কম্পাংক-নির্ভর এক সংখ্যা। কম্পাংক 100 হলে $n = 4.08$, আর 200 হলে 1.63 হয়। 160 ডেসিবেল-এর ঊর্ধ্বে কম্পাংক যাই হোক না কেন, $\delta I/I$-এর মান 0.05 থেকে 0.15-এর মধ্যেই থাকে।

১৭-৭. শাব্দ-প্রাবল্যের পরিমাপ (Phon) :

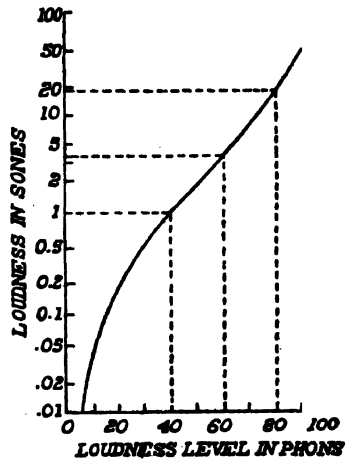
আলো বা শব্দের প্রাবল্য মস্তিষ্ক-স্বীকৃত অনুভূতি। সুতরাং তারা ভৌত রাশি নয়, তাই এদের পরম মাপন সম্ভব নয়। কিন্তু দুই আলো বা শব্দের মধ্যে সামান্য প্রাবল্যভেদও, চোখে বা কানে সহজেই ধরা পড়ে। কাজেই দুই শব্দে সমপ্রাবল্য থাকলে তার বিচার করা কিম্বা প্রাবল্যমাত্রানুযায়ী শব্দ সাজানো, তুলনায় সহজ কাজ। এর থেকেই প্রাবল্যস্তর-মাপার একক—ফন-এর সংজ্ঞা নির্ধারণ করা সম্ভব হয়েছে। যেহেতু তুলনা করতে একটি প্রামাণ্য শব্দ দরকার হয়, তীব্রতার

মতো এখানেও প্রমাণ শব্দের কম্পাংক 1000 চক্র/সে ধরা হয়েছে। কোন শব্দের প্রাবল্য যদি কোন অক্লান্ত বা তাজা শ্রোতার কানে 1000 হার্ৎজ প্রামাণ্য শব্দের প্রাবল্যের সমান মনে হয়, তাহলে প্রামাণ্য শব্দের তীব্রতা-স্তর (10^{-16} ওয়াট/বর্গ সেমি সাপেক্ষে) যত ডেসিবেল, পরীক্ষাধীন শব্দের প্রাবল্যস্তর তত ফন। উদাহরণস্বরূপ, পরীক্ষণীয় শব্দের তীব্রতা-স্তর যাই হোক না কেন, তার প্রাবল্য যদি 1000 চক্র/সে কম্পাংকের 20 ডেসিবেল তীব্রতা-স্তর শব্দের প্রাবল্যের সমান হয়, তাহলে সেই শব্দের প্রাবল্যস্তর 20 ফন (এই পরীক্ষণীয় শব্দের কম্পাংক 2000 হলে, তার তীব্রতা-স্তর 40 db, কিন্তু প্রাবল্যস্তর 20 ফন)।

ব্রিটিশ স্ট্যাণ্ডার্ডস অ্যাসোসিয়েশন নিম্নলিখিতভাবে ফন-কে নির্দিষ্ট করেছেন—"প্রামাণ্য সুর হবে সেকেণ্ডে 1000 চক্রের এবং তার তরঙ্গরূপ সমতলীয় সাইন-জাতীয় হবে এবং সুরের উৎস অক্লান্ত (unfatigued) শ্রোতার ঠিক সামনে থাকবে এবং সে দু'কানেই শব্দ শুনবে। তুলনা করতে, সে পরীক্ষণীয় এবং প্রামাণ্য শব্দ দুইই পর্যায়ক্রমে শুনবে। প্রামাণ্য শাব্দচাপ-স্তরমাত্রা 2×10^{-4} ডাইন/বর্গ সেমি ; এই মান শাব্দচাপের rms মান এবং প্রামাণ্য কম্পাংকে শ্রবণসীমান্তের সমান। প্রামাণ্য শব্দের তীব্রতা-স্তর অব্যাহত চল-তরঙ্গের ক্ষেত্রে মাপা হবে।" এই সমস্ত সর্ত পূরণ ক'রে প্রামাণ্য-তীব্রতা বাড়িয়ে বাড়িয়ে তার প্রাবল্য যখন পরীক্ষাধীন শব্দের প্রাবল্যের সমান করা হবে তখন প্রামাণ্য শব্দের তীব্রতা-স্তর শূন্য তীব্রতা থেকে যত ডেসিবেল বেশী, পরীক্ষণীয় শব্দের প্রাবল্যস্তর তত ফন ব'লে ধরা হবে। ফনে নিলে, প্রাবল্যের মাপ ভৌতভিত্তিক ব'লে মনে করা হয়—এখানে অনুভূতি অমাপনীয় নয়।

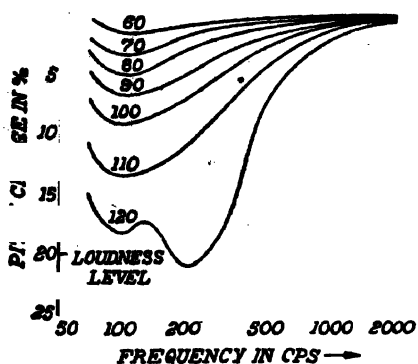
অনেকজন শ্রোতার ওপর পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালিয়ে বিশুদ্ধ সুর তথা তানের (tone) ক্ষেত্রে কম্পাংক বনাম সমপ্রাবল্যস্তরের আবয়ব-রেখা (contour) (চিত্র 17.17) টানা হয়েছে। পরীক্ষাধীন শ্রোতাকে শব্দ-অন্তরিত (sound-proof) ও প্রতিধ্বনি-রহিত কক্ষে স্বনক থেকে এক মিটারের বেশী দূরে রাখা হয়। একটি স্বনক থেকে অপরিবর্তিত তীব্রতার 1000 হার্ৎজের শব্দ বেরোয় ; অপরটি ভাল্‌ভ্-স্পন্দক, তার কম্পাংক

চিত্র 17.17—প্রাবল্যস্তর-কম্পাংক-লেখচিত্র

এবং তীব্রতা দুই-ই বদলানো সম্ভব। প্রথমে, দ্বিতীয় স্বনকের তীব্রতা বদল ক'রে ক'রে শ্রোতার বিচারমতে প্রামাণ্য শব্দের সমান তীব্রতায় আনা হয়—বিচারকালে শব্দ-দুটি শোনা হয় পর্যায়ক্রমে। এবারে স্পন্দকের কম্পাংক বদ্‌লে আবার সেই কম্পাংকে তার তীব্রতা পরিবর্তিত ক'রে আগের মতো করা হয়। এইভাবে প্রামাণ্য শব্দের স্থির তীব্রতা-স্তরে ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে সমপ্রাবল্য-প্রামাণ্য রেখা টানা সম্ভব। এবারে প্রমাণ স্বনকের তীব্রতার মান বদ্‌লে দিয়ে অনুরূপভাবে পর্যবেক্ষণ নেওয়া হয়।

প্রাবল্য-ক্রম (Sone) : মুশকিলের কথা, দুই শব্দের প্রাবল্যান্তর জানা থাকলেই তাদের আবয়ব-রেখা থেকে তাদের একটি অপরটির তুলনায় কতটা জোরালো বলা যায় না—যেমন 100 ফনের শব্দ 50 ফন-এর দ্বিগুণ প্রবল, নাও হতে পারে। তাই বিস্তারিত পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালিয়ে প্রাবল্যের একটি একক, সোন নির্ধারিত হয়েছে—1000 হার্ৎজ কম্পাংকের শব্দের তীব্রতা-স্তর, শূন্য তীব্রতা-স্তরের চেয়ে 40 ডেসিবেল ঊর্ধ্বে হলে, অর্থাৎ প্রাবল্যান্তর 40 ফন হলে, সেই শব্দের শ্রুতিনির্দিষ্ট প্রাবল্য এক সোন। 17.18 চিত্রে ফন (প্রাবল্য-স্তর) এবং সোন-এর (প্রাবল্য) মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে—প্রাবল্যান্তর দ্বিগুণ বা তিনগুণ করলে প্রাবল্য কিন্তু দ্বিগুণ বা তিনগুণ মনে হয় না।

চিত্র 17.18—প্রাবল্য-প্রাবল্যান্তর লেখ

১৭-৮. তীক্ষ্ণতা-বিচার :

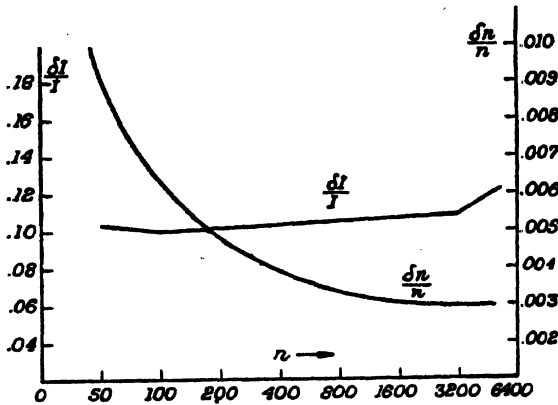
যে অনুভূতি-বিচারে শব্দকে নিচু থেকে উঁচু স্বরগ্রামে (অর্থাৎ, খাদ থেকে চড়ায়) সাজানো যায়, তাকে তীক্ষ্ণতা বলে। প্রাবল্যের মতো এই অনুভূতি-বিচারও মস্তিষ্কে হয়, সুতরাং তীক্ষ্ণতাও, ঠিক পরিমেয় রাশি নয়। সাধারণভাবে তীক্ষ্ণতার অনুভূতি কম্পাংক-নির্ভর ; কম্পাংক বাড়লে তীক্ষ্ণতা চড়া হয়। তবে কম্পাংকের সঙ্গে তীক্ষ্ণতার পরিবর্তন প্রাবল্যান্তরের ওপর এবং স্বরের সুরগঠনের ওপরেও নির্ভর করে।

সুর অর্থাৎ তানের প্রাবল্য বাড়লে তার তীক্ষ্ণতা বদ্‌লায় ব'লে মনে হয় ; তবে তার পরিমাণবিচার, শ্রোতা-ভেদে ভিন্ন হয়। 17.19 চিত্রে প্রাবল্য বদ্‌লালে ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে তীক্ষ্ণতার অনুভূতির স্থানান্তর দেখানো হয়েছে। যা কিছু পরিবর্তন কম কম্পাংকেই ঘটে—বিশেষ ক'রে 70 থেকে 300 চক্রের মধ্যে। এই পাল্লায় প্রাবল্য-স্তর যত বাড়ে তীক্ষ্ণতা-বোধ তত কমে—তীক্ষ্ণতার শতকরা হ্রাস তত বেশী হয়। লক্ষণীয় যে, 1000 হাৎ´জের ওপরে তীক্ষ্ণতার অনুভূতি প্রাবল্য-স্তর নিরপেক্ষ হয়ে যায়।

চিত্র 17.19—তীক্ষ্ণতাভেদ-কম্পাংক-লেখ

আগেই বলা হয়েছে যে, কানের তীক্ষ্ণতাভেদ-সচেতনতা (frequency discrimination) তীব্রতা ও কম্পাংক দুয়ের ওপরেই নির্ভর করে। দুইই অল্পমাত্রা থাকলে, এদের বেশ কয়েক শতাংশ পরিবর্তন না হলে কম্পাংকভেদ অনুভূত হয় না ; যেমন 10 ডেসিবেল তীব্রতায় 30 চক্রের সুরের কম্পাংকে 9% পরিবর্তন হলে, তবে কম্পাংকভেদ বোঝা যাবে। কাজেই 30 এবং 32 চক্র কম্পাংকের সুরের তীক্ষ্ণতা অভিন্নই বোধ হবে। এই ঘটনা থেকে বোঝা যায় যে, তীক্ষ্ণতা আর কম্পাংক এক জিনিস নয়।

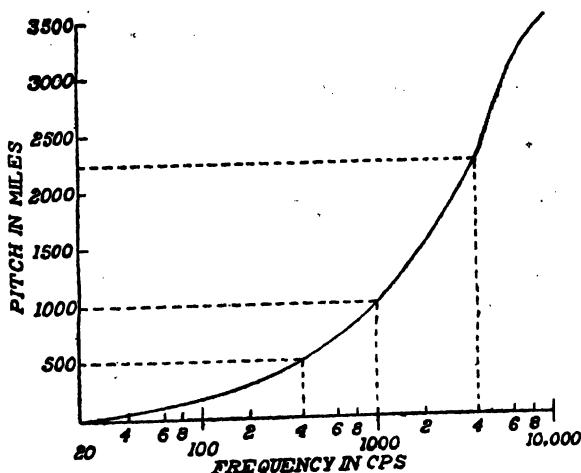
বিজ্ঞানী ফ্লেচার-এর মতে, প্রবল শব্দের তীক্ষ্ণতা-বোধ, তার তীব্রতা এবং তরঙ্গরূপের ওপরেও নির্ভর করে। অতি প্রবল শব্দে খুব কম বা খুব বেশী তীক্ষ্ণতা শ্রবণগ্রাহ্য নয়, অনুভূতিসাপেক্ষ—পাল্লার দুই সীমান্তেই তীক্ষ্ণতা সম্পর্কে কানের সচেতনতা কম। 1000 চক্রেই কান সবচেয়ে তীক্ষ্ণতা-সচেতন। 17.20 চিত্রে ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংকে কানের তীব্রতা ও তীক্ষ্ণতার সচেতনতা বা অনুভূতি ($\delta I/I$ এবং $\delta n/n$) কি-ভাবে বদ্‌লায়, তা নির্দেশিত হয়েছে।

মিশ্র সুরের তীক্ষ্ণতা-বোধ আবার, অঙ্গসুরগুলির কম্পাংকভেদে প্রভাবিত হয়। মিশ্র সুর থেকে মূল কম্পাংকটি অপসারিত হলে (অনুপস্থিত মূল সুর) কিন্তু তীক্ষ্ণতার অনুভূতি বিশেষ বদ্‌লায় না। মিশ্র সুরে যদি মূল সুরের কতকগুলি সমমেল থাকে, তাহলে সুরের আপাত-তীক্ষ্ণতা মূল সুরের সমানই লাগে ; অঙ্গসুরগুলির কম্পাংক যদি 400, 600 বা 800 চক্রের মতো হয়, তবে তীক্ষ্ণতা

200 চক্রের মতো লাগবে। যদি এদের মধ্যে 500, 700 প্রভৃতি চক্রের সুর ঢোকানো যায়, তাহলে তীক্ষ্ণতা 100 চক্রের অনুভূতিতে নেমে যাবে। কানের গঠনবৈশিষ্ট্য বা মস্তিষ্কের কোন অজানা ক্রিয়ায় অনুপস্থিত মূলসুরের অনুভূতি মিশ্রসুরে অন্তর্নিবিষ্ট হয়। এক্ষেত্রে ওহ্‌ম সূত্র (§১৭-৫) অচল, কেননা কানের বাইরে বায়ুতে এই কম্পাংকের কোন স্পন্দন থাকে না। আবার সমপ্রাবল্যের অনেকগুলি অবিন্যস্ত সুর একসঙ্গে মেলালে মিশ্রসুরের তীক্ষ্ণতা তাদের গড় কম্পাংকের মতোই লাগে।

চিত্র 17.20—কম্পাংকের সঙ্গে তীব্রতা- ও তীক্ষ্ণতা-সচেতনতার সম্পর্ক

স্বনক, শ্রোতা বা মধ্যবর্তী মাধ্যমের যেকোন একটি, দুটি বা সব-ক'টির মধ্যে আপেক্ষিক গতি ঘটলে তীক্ষ্ণতা উল্লেখযোগ্যভাবে বদ্‌লায়—তাকে বলে ডপ্‌লার-ক্রিয়া।

তীক্ষ্ণতা অনুভূতিসাপেক্ষ রাশি হলেও তার একটি একক স্থির হয়েছে—তার নাম **মেল**। অবম কর্ণগ্রাহ্য শাব্দচাপ (2×10^{-4} ডাইন/বর্গ সেমি) সাপেক্ষে 60 ডেসিবেল তীব্রতা-স্তরের শব্দকে 1000 মেল (mel) ব'লে ধরা হয়। ভৌত রাশি, কম্পাংক (CPS) এবং অনুভূতি, তীক্ষ্ণতার (MEL) মধ্যে সম্পর্ক 17.21 চিত্রে [ছবিতে MEL-এর জায়গায় ভুল ক'রে MILES ছাপা হয়েছে] দেখানো হয়েছে। এজন্যে শ্রোতার কানে পর্যায়ক্রমে ভাল্‌ভ্‌-স্পন্দক থেকে দুই তানই পৌঁছতে থাকে; একটির কম্পাংক স্থির থাকে, অপরটির ক্রমে ক্রমে বদ্‌লানো হয়, যতক্ষণ না শ্রোতার বিচারে দ্বিতীয় তানের

তীক্ষ্ণতা প্রথমের দ্বিগুণ মনে হয়। ক্রমে ক্রমে গোটা শ্রবণপাল্লা এই-রকম পর্যবেক্ষণ চালিয়ে এই রেখাটি টানা হয়েছে।

চিত্র 17.21—কম্পাংক-তীক্ষ্ণতা-লেখচিত্র

১৭-৯. ডপ্‌লার-তত্ত্ব :

স্বনক ও শ্রোতার মধ্যে আপেক্ষিক গতি—তীক্ষ্ণতার অনুভূতি-নিয়ন্ত্রণে গুরুত্বপূর্ণ ভূমিকা নেয়। সে তথ্য আমরা পাই ডপ্‌লার-তত্ত্ব থেকে। এই তত্ত্ব বলে—যখনই স্বনক ও শ্রোতার মধ্যে আপেক্ষিক গতি ঘটে তখনই তীক্ষ্ণতার আপাত অনুভূতি আসল তীক্ষ্ণতা থেকে আলাদা হয়। যখনই তাদের মধ্যে দূরত্ব কমে তখনই আপাত তীক্ষ্ণতা বাড়ে ; দূরত্ব বাড়লে তীক্ষ্ণতা কমে।

দৈনন্দিন জীবনে এর উদাহরণ অজস্র। দ্রুতগামী রেল-এঞ্জিন 'সিটি' দিতে দিতে বা ইলেকট্রিক হর্ন বাজাতে বাজাতে ধাবমান বাস কিম্বা নিচুতে উড়ন্ত জেট-বিমান শ্রোতার দিকে এগোতে থাকলে যে তীক্ষ্ণতা চড়া হতে হতে প্রায় অসহ্য হয়ে ওঠে, তা সহরবাসী-মাত্রেরই জানা। তা ছাড়া, তারা শ্রোতাকে অতিক্রম করামাত্রেই তীক্ষ্ণতা হঠাৎ কমে যায় এবং যত সরে যায় ততই তীক্ষ্ণতা কমতে থাকে—সে অভিজ্ঞতাও আমাদের আছে। শ্রোতা স্বনকের গতিপথের যত কাছে থাকে, বা আপেক্ষিক গতি যত দ্রুত হয়, তীক্ষ্ণতার পরিবর্তনও তত প্রকট হতে দেখা যায়।

সবরকমের তরঙ্গগতির ক্ষেত্রেই এটা ঘটে থাকে ; তবে পরিবর্তন বোধগম্য হতে হলে, আপেক্ষিক বেগ তরঙ্গবেগের উল্লেখযোগ্য ভগ্নাংশ হওয়া চাই। বর্তমানে দ্রুতগামী স্বনকের সংখ্যা যথেষ্ট হওয়ায়, শব্দের বেলায় তীক্ষ্ণতার ডপ্‌লার-পরিবর্তন সহজেই ধরা পড়ে। আলো ঢের বেশী দ্রুতগামী হওয়ায় সেক্ষেত্রে এই পরিবর্তন ধরা বেশ কষ্টকর। তবু বর্ণালীবীক্ষণ-যন্ত্রে পৃথিবীমুখী বা পৃথিবীবিমুখী তারা বা অন্যান্য জ্যোতিষ্ক থেকে আগত আলোকতরঙ্গের কম্পাংকে সামান্য হেরফের ধরা পড়েছে।

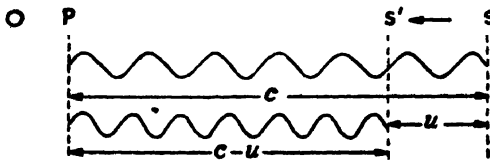
তীক্ষ্ণতা-পরিবর্তনের কারণ : শব্দতরঙ্গের ক্ষেত্রে তিনটিই প্রয়োজন —স্বনক, শ্রোতা এবং শব্দবাহী মাধ্যম। এদের যেকোনটি সচল হলেই তীক্ষ্ণতা বদ্‌লাবে।

(১) স্বনক সচল ও শ্রোতা স্থির থাকলে, নির্দিষ্ট সময়ে উদ্ভূত তরঙ্গগুলি স্থির স্বনকের তরঙ্গমালার তুলনায় বেশী বা কম জায়গা জুড়ে থাকে, ফলে তরঙ্গদৈর্ঘ্য বাড়ে কমে ; কাজেই কম্পাংক কমে কিম্বা বাড়ে ($\because$ $n\lambda=$ ধ্রুবক)।

(২) স্বনক স্থির এবং শ্রোতা সচল হলে, তার কাছে এক সেকেণ্ডে বেশী বা কমসংখ্যক তরঙ্গ পৌঁছয় ; সুতরাং কম্পাংক বাড়ে বা কমে।

(৩) মাধ্যম সচল, শ্রোতা ও স্বনক স্থির থাকলে শব্দবেগের ($c=n\lambda$) তারতম্য ঘটে। উৎপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) স্থিরমান থাকে, সুতরাং (n) বদ্‌লাবে।

আমরা **একই সরলরেখা** বরাবর স্বনক, শ্রোতা ও মাধ্যমের গতি বিবেচনায় ডপ্‌লার তত্ত্ব আলোচনা ক'রবো। সংযোগকারী রেখা বরাবর আপেক্ষিক গতি হলে তীক্ষ্ণতার পরিবর্তন সবচেয়ে বেশী অনুভূত হয়।

ক. সচল স্বনক, অচল শ্রোতা ও মাধ্যম : (১) 17.22 (a) চিত্রে ধরা হয়েছে স্বনক S (কম্পাংক n, উৎপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্য λ) শ্রোতা O-র দিকে

চিত্র 17.22(a)—শ্রোতা-মুখী সচল স্বনক ও তীক্ষ্ণতা-বৃদ্ধি

u বেগে এগোচ্ছে। এক সেকেণ্ডে তার দ্বারা অতিক্রান্ত দূরত্ব $SS'=u$ এবং সেই সময়ে n-সংখ্যক তরঙ্গ উৎপন্ন হয়ে প্রথমটি P বিন্দুতে পৌঁছবে আর

শেষেরটি S' বিন্দুতে থাকবে। শব্দের বেগ c হওয়ায়, $SP=c$ এবং $S'P=c-u$; তাই $S'P$ দূরত্বের মধ্যেই n-সংখ্যক তরঙ্গ থাকবে। স্পষ্টতই তাদের দৈর্ঘ্য সংকুচিত হবে এবং ফলে তরঙ্গদৈর্ঘ্য হবে

$$\lambda'=\frac{c-u}{n}=\frac{c-u}{c/\lambda}=\lambda\left(\frac{c-u}{c}\right) \qquad (১৭\text{-}৯.১ক)$$

সুতরাং আপাত কম্পাংক দাঁড়াবে

$$n'=\frac{c}{\lambda'}=\frac{c}{(c-u)/n}=n\cdot\frac{c}{c-u} \qquad (১৭\text{-}৯.১খ)$$

∴ কম্পাংকের আনুপাতিক পরিবর্তন

$$\frac{n'-n}{n}=\frac{n'}{n}-1=\frac{c}{c-u}-1=\frac{u}{c-u} \qquad (১৭\text{-}৯.১গ)$$

(২) 17.22(b) চিত্রে সেই স্বনকই u বেগে শ্রোতা থেকে দূরে সরে

চিত্র 17.22(b)—শ্রোতা-বিমুখী সচল স্বনক ও তীক্ষ্ণতা-হ্রাস

যাচ্ছে। আগের মতো বিবেচনা করলে এক সেকেণ্ডে S যতগুলি শব্দ-তরঙ্গ উৎপাদন করেছে তারা $S'P=c+u$ দূরত্ব জুড়ে থাকবে। সুতরাং

$$\lambda'=\lambda(c+u)/c \text{ এবং } n'=nc/(c+u) \qquad (১৭\text{-}৯.২)$$

দুটি ঘটনা আলোচনা করলে দেখা যাচ্ছে যে, স্বনক শ্রোতার দিকে এগোলে তীক্ষ্ণতা বাড়ে এবং পেছোলে তীক্ষ্ণতা কমে।

খ. সচল শ্রোতা, অচল স্বনক এবং মাধ্যম : (১) 17.23(a) চিত্রে শ্রোতা v বেগে স্বনকের দিকে এগোচ্ছে। স্বনক S, নিরন্তর n কম্পাংকের এবং λ দৈর্ঘ্যের তরঙ্গ উৎপন্ন ক'রে গেলে, এক সেকেণ্ডে উৎপন্ন n-সংখ্যক

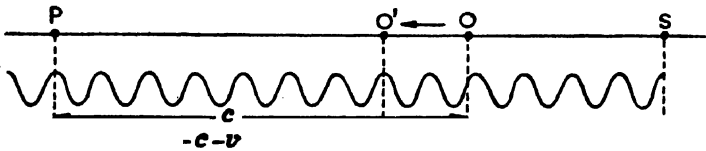
চিত্র 17.23(a)—স্বনক-মুখে সচল শ্রোতার কানে তীক্ষ্ণতা-বৃদ্ধি

তরঙ্গ শ্রোতাকে অতিক্রম ক'রে গিয়ে $OP=c$ দূরত্ব জুড়ে থাকার কথা। এই সময়ের মধ্যে কিন্তু শ্রোতা উৎসের দিকে $OO'=v$ দূরত্ব এগিয়েছে। সুতরাং $O'P$ দূরত্বের মধ্যবর্তী সব তরঙ্গগুলিই তার কানে পৌঁছবে। এই দূরত্ব $(c+v)$ এবং তরঙ্গসংখ্যা $n+v/\lambda$; সুতরাং শ্রোতার কানে আপাত তীব্রতার মান হবে

$$n'=n+v/\lambda=n+\frac{v}{c/n}=n+\frac{nv}{c}=n\frac{c+v}{c} \qquad (১৭\text{-}৯.৩ক)$$

আপাত তরঙ্গদৈর্ঘ্য

$$\lambda'=c/n'=\frac{c}{n}\cdot\frac{c}{c+v}=\lambda\frac{c}{c+v} \qquad (১৭\text{-}৯.৩খ)$$

(২) 17.23(b) চিত্রে শ্রোতা (O), স্বনক (S) থেকে সরে যাচ্ছে ;

চিত্র 17.23(b)—স্বনক-বিমুখী সচল শ্রোতার কানে তীক্ষ্ণতা-হ্রাস

ফলে $(c-v)$ দূরত্বের মধ্যবর্তী তরঙ্গগুলি তার কানে পৌঁছবে। সুতরাং

$$n'=n\frac{c-v}{c} \text{ এবং } \lambda'=\lambda\frac{c}{c-v} \qquad (১৭\text{-}৯.৪)$$

অতএব শ্রোতা স্বনকের দিকে এগোলে তীক্ষ্ণতা বাড়ে, পেছোলে কমে।

এই দুই ঘটনা তুলনা করলে দেখা যাবে যে, স্বনক বা শ্রোতার এগোনোর আপেক্ষিক বেগ সমান হলেও তীক্ষ্ণতা-বৃদ্ধি আলাদা হবে। ১৭-৯.৩ (ক)-তে $v=u$ বসালে, $n'-n=nu/c$ পাচ্ছি, আর ১৭-৯.১ (গ)-তে $n'-n=nu/(c-u)$ হচ্ছে। তার কারণ, শ্রোতা এগোলে বেশীসংখ্যক তরঙ্গ তার কানে পৌঁছয় আর স্বনক এগোলে তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছোট হয়ে যায়। তবে শব্দবেগ (c) আপেক্ষিক বেগের (u) তুলনায় অনেক বেশী হলে, এই পার্থক্য আর থাকে না। কারণ ১৭-৯.১ (খ) থেকে

$$n'=\frac{nc}{c-u}=\frac{n}{(1-u/c)}\simeq n(1+u/c)=n(c+u)/c$$

হয়, অর্থাৎ ফল ১৭-৯.৩ (ক)-এর সমানই [দ্বিপদ উপপাদ্যে ভগ্নাংশটি ক্ষুদ্র হয়]।

শ্রোতার গতিপথ থেকে স্বনকের লম্বদূরত্ব $ON(=d)$ এবং স্বনকের অতিক্রান্ত পথ $S_1N(=x)$ বদ্‌লালে তীক্ষ্ণতা কি-ভাবে বদ্‌লায় তার একটা সম্পর্ক বার করা সম্ভব। 17.25(b) চিত্রে S_1 এবং O-এর ভিন্ন ভিন্ন অবস্থানে তীক্ষ্ণতার পরিবর্তনের রূপরেখা দেখানো হয়েছে। দেখা যাচ্ছে, $\alpha=0$ চিহ্নিত রেখায় x বনাম n' বক্রে পরিবর্তন খরতম। প্রথম, দ্বিতীয়, তৃতীয় ইত্যাদি বক্রে α ক্রমশ বাড়ছে এবং সেক্ষেত্রে তীক্ষ্ণতার পরিবর্তন ক্রমশই নিস্তেজ হয়ে আসছে—পরিবর্তনে খরতা কমছে। প্রয়োজনীয় সম্পর্কটি বার করতে আমরা ১৭-৯.৮ সমীকরণকে বিকল্পরূপে প্রকাশ ক'রবো

চিত্র 17.25(b)
গতিপথ-দূরত্ব ও ডপ্‌লার-পরিবর্তন লেখচিত্র

$$n'=n\frac{c+v\cos\theta}{c}=n\left(1+\frac{v}{c}\cos\theta\right)$$

$$=n\left(1+\frac{v}{c}\cdot\frac{x}{\sqrt{x^2+d^2}}\right) \qquad (১৭\text{-}৯.৯)$$

এই সমীকরণ থেকে, সচল শ্রোতা স্বনকের নিকটবর্তী হতে থাকলে তীক্ষ্ণতার আপাত মানের সাধারণ মান মেলে। সেই বিশেষ ক্ষেত্রে যখন $\alpha=0$, আমরা পাচ্ছি $n'=n(1+v/c)$; এই মান ১৭-৯.৩ক-এর সঙ্গে অভিন্ন।

উদাহরণ : দুটি সোজা রাস্তা পরস্পর সমকোণে আছে। একটি বরাবর একটি মোটরগাড়ি ঘণ্টায় 60 মাইল বেগে হর্ন বাজাতে বাজাতে ($n=200$/সে) যাচ্ছে ; অপর রাস্তা ধ'রে একজন সাইকেলে 30 মাইল বেগে প্রথম রাস্তার দিকে আসছে। মোটর এবং সাইকেল যখন দুই রাস্তার মোড় থেকে সমান দূরে তখন সাইকেল-আরোহী কী তীক্ষ্ণতার শব্দ শুনবে ?

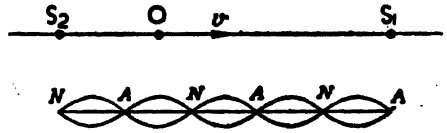
($c=1100$ ফি/সে)

সমাধান : উল্লিখিত বিন্দুতে স্বনক ও শ্রোতার সংযোগকারী দূরত্ব দুই রাস্তার সঙ্গেই 45° কোণ করবে। মোটরের বেগ সেকেণ্ডে 88 ফিট, সুতরাং সংযোগরেখা বরাবর শব্দবেগ 88 cos 45° ফি/সে। সুতরাং সাইকেল

অভিমুখে শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য কমবে, অতএব ১৭-৯.৭ক প্রযোজ্য। আবার যেহেতু শ্রোতা স্বনকের নিকটবর্তী হচ্ছে, তাই ১৭-৯.৮ প্রযোজ্য। সুতরাং তীক্ষ্ণতার মান হবে

$$n' = u\frac{c+v\cos 45^\circ}{c-u\cos 45^\circ} = 200 \times \frac{1100+44\times 1/\sqrt{2}}{1100-88/\sqrt{2}}$$

$$= 200 \times \frac{1100+22\sqrt{2}}{1100-44\sqrt{2}} = 200 \times \frac{51.41}{47.18} = 218/\text{সে}$$

চ. ডপ্‌লার-তত্ত্ব, স্বরকম্প এবং স্থাণুতরঙ্গের মধ্যে সম্পর্ক: (চিত্র 17.26)। S_1 এবং S_2 দুই স্থির স্বনক এবং শ্রোতা (O), v বেগে S_1S_2 বরাবর S_1-এর দিকে এগোচ্ছে। দুই স্বনকেরই কম্পাংক সমান। স্পষ্টতই বোঝা যাচ্ছে যে, শ্রোতা S_1-এর দিকে এগোচ্ছে ব'লে ঐ স্বনকের আপাত তীক্ষ্ণতা মনে হবে $n' = n(c+v)/c$; আর যেহেতু শ্রোতা, S_2 থেকে দূরে সরে যাচ্ছে, সেই স্বনকের আপাত তীক্ষ্ণতা $n'' = n(c-v)/c$ হয়ে দাঁড়াবে। কাজেই শ্রোতা $n' - n''$ $(=2nv/c)$ কম্পাংকের স্বরকম্প শুনতে পাবে।

চিত্র 17.26—স্থাণুতরঙ্গ ও আপেক্ষিক বেগজনিত স্বরকম্প

যেহেতু দুই স্বনক অভিন্ন-কম্পাংক, S_1S_2 বরাবর স্থাণুতরঙ্গ হয়ে থাকবে এবং শ্রোতা একে একে সরণনিস্পন্দবিন্দু অতিক্রম ক'রে যেতে থাকবে। এক সেকেণ্ডে অতিক্রান্ত নিস্পন্দবিন্দুর (অর্থাৎ স্বরকম্পের) সংখ্যা দাঁড়াবে $v/\frac{1}{2}\lambda = 2v/\lambda = 2vn/c$; দেখ, স্বরকম্পের সরাসরি বিবেচনা থেকে আমরা একই ফল পেয়েছি।

প্রশ্ন: A এবং B দুই জায়গায় 250 চক্রের সাইরেন বাজছে। ঘণ্টায় 7.5 মাইল বেগে সচল শ্রোতা সেকেণ্ডে 5টি স্বরকম্প শুনলে শব্দের বেগ কত? [1100 ফি/সে]

ছ. দর্পণ থেকে লব্ধ-প্রতিফলনে তীক্ষ্ণতার ডপ্‌লার-সরণ: স্থির স্বনক থেকে উৎপন্ন শব্দতরঙ্গ স্থির প্রতিফলক থেকে ফিরে এলে স্থাণু-তরঙ্গের উৎপত্তি হয়। যদি স্বনক বা দর্পণ যেকোনটি সচল হয়, তাহলে স্থাণুতরঙ্গের গোটা সমাবেশটিও সমবেগে চলতে সুরু করে; সুতরাং স্থির

শ্রোতার কানে স্বরকম্পের চেতনা জাগে। অবশ্য স্বনক ও শ্রোতা একযোগে সচল হলেও স্বরকম্পের অনুভূতি ঘটবে।

(১) দর্পণ স্থির, স্বনক ও শ্রোতা একযোগে সচল : স্বনক সমতল প্রতিফলকের দিকে সমবেগে (v) এগোতে থাকলে তার সমদূরবর্তী 'অলীক বিম্ব'ও তার দিকে এগোতে থাকবে। আলোর প্রতিফলনের নজির টেনে বলা যায় যে, তখন উৎস এবং প্রতিবিম্ব পরস্পরের দিকে $2v$ বেগে এগোবে। এই আপেক্ষিক বেগের ফলে তীক্ষ্ণতা বাড়বে, অর্থাৎ তীক্ষ্ণতার ডপ্‌লার-সরণ ঘটবে। শ্রোতা যদি স্বনকের সঙ্গেই চলে, তাহলে সে স্বনকের সমকম্পাংকের একটি শব্দ আর প্রতিফলনের ফলে পরিবর্তিত তীক্ষ্ণতার অপর শব্দ শুনবে। স্বনকের বেগ খুব বেশী না হলে, সে স্বরকম্প শুনতে পাবে।

উদাহরণ : 500 কম্পাংকে হুইশ্‌ল্ বাজাতে বাজাতে একটি রেল-এঞ্জিন এক সেতুর দিকে 5 ফিট/সে বেগে এগোতে থাকলে, এঞ্জিন-চালক সেকেণ্ডে ক'বার স্বরকম্প শুনবে? (শব্দের বেগ = 1100 ফি/সে)

সমাধান : এঞ্জিন-চালক দুটি শব্দ শুনবে—একটি সরাসরি, তার কম্পাংক অপরিবর্তিত, অপরটি সেতু থেকে প্রতিফলিত—তার কম্পাংক—হুইশ্‌ল ও তার প্রতিবিম্বের মধ্যে আপেক্ষিক গতির জন্যে পরিবর্তনশীল।

অলীক শব্দ-উৎস স্থির ধ'রে নিলে শ্রোতা তার দিকে $2v$ বেগে এগোচ্ছে ধরা যায়। সুতরাং ১৭-৯.৩ক সমীকরণ অনুসারে

$$n' = n(1+2v/c) = 500(1+10/1100)\ ;$$

সুতরাং স্বরকম্পের সংখ্যা হবে $(n'-n) = n.2v/c = 4.6$/সে।

(২) স্বনক সচল, শ্রোতা এবং দর্পণ স্থির : এক্ষেত্রে স্বনক ও শ্রোতার মধ্যে দূরত্ব বদ্‌লাচ্ছে, আবার অলীক শব্দবিম্ব ও শ্রোতার মধ্যেও তা বদ্‌লাচ্ছে। সুতরাং তীক্ষ্ণতার দু'রকম ডপ্‌লার-সরণই হচ্ছে। স্বনক খুব দ্রুতগতিতে না চললে স্থির শ্রোতা আগের মতো স্বরকম্প শুনবেন। বস্‌কা এই পন্থায় শব্দের বেগ (২১ অধ্যায় দেখ) নির্ণয় (১৮৫৯) করেছেন।

উদাহরণ : 440 কম্পাংকের এক সুরশলাকা 4 মি/সে বেগে দেয়ালের দিকে এগোলে স্থির শ্রোতা ক'বার স্বরকম্প শুনবেন? (শব্দবেগ = 332 মি/সে)

সমাধান : শ্রোতার দুটি সম্ভাব্য অবস্থান বিবেচ্য—(১) স্বনক, শ্রোতা ও দেয়ালের মধ্যবর্তী, (২) শ্রোতা, স্বনক ও দেয়ালের মধ্যবর্তী।

প্রথম ঘটনায় সচল স্বনক ক্রমশই শ্রোতা থেকে দূরে যাবে, কিন্তু শাব্দবিম্ব অচল শ্রোতার দিকে এগোবে। তাহলে

$$n_1 = nc/(c+u) = 440 \times 332/336 = 434.8/\text{সে}$$

এবং $n_2 = nc/(c-u) = 440 \times 332/328 = 445.6/\text{সে}$।

সুতরাং স্বরকম্পের সংখ্যা $= n_2 - n_1 = 10.6/\text{সে}$।

দ্বিতীয় ঘটনায় স্বনক এবং বিম্ব দুইই শ্রোতার দিকে এগোবে। এখানে স্বরকম্প হবে না। (কেন ?)

(৩) **স্বনক ও শ্রোতা স্থির, দর্পণ সচল :** এক্ষেত্রে প্রতিফলিত তরঙ্গদৈর্ঘ্য বদ্‌লানোর ফলে তীক্ষ্ণতার ডপ্‌লার-সরণ হবে। এই ঘটনাকে অনেক সময়ে **ডপ্‌লার নীতি** বলে। কোন **আবদ্ধ গহ্বরে তাপের বিকিরণ-ঘনত্ব-নির্ণয়ে** Wien-এর সূত্রে এই নীতির সফল প্রয়োগ করা হয়েছে।

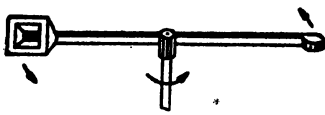
স্বনকের দিকে v বেগে আগুয়ান প্রতিফলকে লম্ব-আপতন ঘটলে, এক সেকেণ্ডে তার ওপর আপতিত শক্তি $(c+v)$ দৈর্ঘ্য জুড়ে থাকার কথা ; তাতে শব্দতরঙ্গের সংখ্যা হবে $(c+v)/\lambda = n(c+v)/c$; স্বভাবতই এই সময়ে প্রতিফলিত শক্তি $(c-v)$ দৈর্ঘ্য জুড়ে থাকবে এবং তার মধ্যে তরঙ্গসংখ্যা $n(c-v)/c$ হবে। তাহলে প্রতিফলিত তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং কম্পাংক দাঁড়াবে

$$\lambda' = \frac{c-v}{n(c+v)/c} = \frac{c}{n} \cdot \frac{c-v}{c+v} = \lambda \frac{c-v}{c+v}$$

এবং $$n' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{n(c+v)}{c-v} = n\left(1 + \frac{2v}{c-v}\right) \qquad (১৭\text{-}৯.১০)$$

সুতরাং কম্পাংকের পরিবর্তন দাঁড়াবে $n' - n = n.2v/(c-u)$। কাজেই স্থির শ্রোতা সরাসরি এবং প্রতিফলিত তরঙ্গের ক্রিয়ায় এই সংখ্যার স্বরকম্প শুনবেন।

প্রশ্ন : ঘণ্টায় 30 মাইল বেগে আগুয়ান একটি দোতলা বাসের ওপরে 120 কম্পাংকের শব্দতরঙ্গ পড়লে স্থির শ্রোতার কানে ক'বার স্বরকম্প ঘটবে ? (শব্দবেগ সেকেণ্ডে 1100 ফিট) [10.4/সে]

জ. ডপ্‌লার তীক্ষ্ণতা-সরণের পরীক্ষণ : পরীক্ষাগারে বহু পরীক্ষা-নিরীক্ষায় ডপ্‌লার-তত্ত্বের সত্যতা যাচাই হয়েছে। প্রয়োগবিদ্যার অভাবনীয় উন্নতির ফলে এত দ্রুতগামী আলোকতরঙ্গের ক্ষেত্রেও এই তত্ত্বের যাথার্থ্য প্রতিষ্ঠিত হয়েছে—এই প্রমাণ ডপ্‌লার নীতি প্রয়োগ ক'রেই মিলেছে।

(১) পরীক্ষাগারে প্রায় এক মিটার লম্বা দণ্ডের প্রান্তে একটি স্পন্দনক্ষম পত্রী লাগিয়ে দণ্ডটিকে ঘূর্ণকের সাহায্যে অনুভূমিক তলে দ্রুতবেগে ঘোরালে (চিত্র 17.27) পত্রী হাওয়া কেটে চলার দরুন শোঁ-শোঁ শব্দ করে। সে স্থির শ্রোতার দিকে এগোলে তীক্ষ্ণতা বাড়তে এবং দূরে সরে যেতে থাকলে তীক্ষ্ণতা কমতে দেখা যায়। কলকাতা বা উপকণ্ঠে দ্রুতগামী বাসের ইলেকট্রিক হর্নের শব্দের ভুক্তভোগীমাত্রেই এই ব্যাপারের সঙ্গে পরিচিত।

চিত্র 17.27—ডপ্‌লার তীক্ষ্ণতার সরণ

উদাহরণ : 1024 কম্পাংকের একটি পত্রী যদি এক মিটার লম্বা দড়িতে বেঁধে সেকেণ্ডে পাঁচবার অনুভূমিক বৃত্তপথে ঘোরানো যায়, তাহলে কিছু দূরে শ্রোতার কানে সর্বোচ্চ ও সর্বনিম্ন কত কত তীক্ষ্ণতার অনুভূতি হবে? (শব্দবেগ = 340 মি/সে)

সমাধান : পত্রীর রৈখিক বেগ $v=\omega r=2\pi nr=2\pi\times5\times1$ মি/সে = 31.42 মি/সে। পত্রী যখন শ্রোতার দিকে এগোচ্ছে তখন তীক্ষ্ণতা বাড়বে এবং তার চরম মান হবে

$$n_1=nc/(c-v)=1024\times340/(340-31.42)=1128/\text{সে}$$

অনুরূপে তীক্ষ্ণতার অবম মান হবে $n_2=nc/(c+v)\simeq 937/$সে

(২) হাম্‌বী একটি বিদ্যুৎস্পন্দী বর্তনী থেকে দুটি টেলিফোন সক্রিয় করেন। তাদের একটিকে নিয়ে শ্রোতা সরে যেতে থাকলে তিনি স্বরকম্প শুনতে পাবেন। তার সংখ্যা তাঁর বেগসাপেক্ষ এবং দেখা গেছে তত্ত্বসম্মত। আবার একটি টেলিফোন সক্রিয় ক'রে তাকে বিস্তৃত দেয়ালের দিকে নিয়ে গেলেও তত্ত্বসম্মত স্বরকম্পের সংখ্যা শোনা যায়।

(৩) স্বনকম্পাংক-উৎপাদী অর্থাৎ A.F. বিদ্যুৎস্পন্দক যদি 3000 চক্রের সুর উৎপাদন করে, তবে তার দিকে শ্রোতা এগোলে বা পেছোলে তীক্ষ্ণতাভেদ নিজেই বুঝতে পারে। এই বেগ শব্দবেগের মাত্র হাজার ভাগের এক ভাগ হলেই চলবে। [আগেই বলা হয়েছে যে, 3500 চক্র-কম্পাংকে মাত্র 3 চক্রের তফাৎও কানে ধরা পড়ে।]

খেয়াল রাখা ভালো যে, শ্রোতা ও স্বনকের মধ্যে আপেক্ষিক বেগের এক ঊর্ধ্বসীমা পর্যন্ত তীক্ষ্ণতার ডপ্‌লার-সরণ সম্ভব। শব্দোত্তর বেগের বেলায় আগুয়ান স্বনক বা শ্রোতার বেলায় ডপ্‌লার-তত্ত্ব প্রযোজ্য নয়।

ঘ. আলো ও ডপ্‌লার-তত্ত্ব : আলোকতরঙ্গের ক্ষেত্রেও আকাশে জ্যোতিষ্কের গতিবিধি-সন্ধানে ডপ্‌লার-তত্ত্ব প্রযোজ্য। এক্ষেত্রে আমরা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের হ্রাসবৃদ্ধি দিয়ে ডপ্‌লার-সরণ বিবেচনা করি। আলোর বেগ c এবং জ্যোতিষ্কের পৃথিবী-সাপেক্ষিক বেগ v হলে, λ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের কোন বর্ণালীরেখার দৈর্ঘ্যভেদ $\pm d\lambda = \lambda(v/c)$ হয় (১৭-৯.১ক দেখ)।

(১) আকাশে কোন তারা আমাদের দিকে এগোলে, তার থেকে বিকিরিত কোন বর্ণালীরেখা বর্ণালীর নীল প্রান্তের দিকে সরে যায় ; সে যদি সরে যেতে থাকে, তাহলে রেখাটি বর্ণালীর লাল প্রান্তের দিকে সরে যায়। এই সরণ থেকে যে-কোন জ্যোতিষ্কের পৃথিবী-সাপেক্ষ গতিবেগ বার করা যায়।

উদাহরণ : কোন এক তারার 4000Å সেমি তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক বর্ণালীরেখা লাল প্রান্তের দিকে 1Å সরে গেলে তারাটির বেগ ও সরণ-অভিমুখ কি ?

সমাধান : বর্ণালী-সরণের অভিমুখ থেকে স্পষ্ট যে তারাটি সরে যাচ্ছে। সরণের পরিমাণ হচ্ছে $d\lambda = (v/c)\lambda$;

সুতরাং $$v = c.\frac{d\lambda}{\lambda} = 3 \times 10^{10} \times \frac{1}{4000}$$

$$= \tfrac{3}{4} \times 10^{7} = 75 \text{ কিমি/সে}$$

(২) সূর্যের অক্ষসাপেক্ষে আবর্তন থাকায় তার এক প্রান্তে আগুয়ান বর্ণালীরেখার নীল প্রান্তের দিকে সরণ আর অপসৃয়মান অপর প্রান্তে সেই বর্ণালীরেখারই লাল প্রান্তের দিকে সরণ ঘটে। জানা তরঙ্গদৈর্ঘ্যের দুই প্রান্তের সরণ এবং সূর্যের ব্যাস জেনে সূর্যের আহ্নিক আবর্তনের মান 27.3 দিন স্থির হয়েছে। [ঘটনাটি আগের পাতার প্রথম উদাহরণের সমজাতীয়]

(৩) বিদ্যুৎক্ষরণ-নলে আলো-উৎপাদী অণুগুলি সব দিকেই ছুটে বেড়াচ্ছে। তাদের কিছু দর্শকের দিকে, কিছু আবার উল্টো দিকে ছুটছে। ফলে, তাদের সৃষ্ট আলোকতরঙ্গে দৈর্ঘ্যের ডপ্‌লার-সরণ হয়। এই কারণে বর্ণালী-বীক্ষণে এক-রঙা বর্ণালীরেখা জ্যামিতিক রেখা হয় না, অল্পবিস্তর প্রস্থ-বিশিষ্ট হয়।

১৭-১০. স্বনজাতি :

যে ইন্দ্রিয়গ্রাহ্য বৈশিষ্ট্যের সাহায্যে সমপ্রবল ও সমতীক্ষ্ণ দুই শব্দের মধ্যে প্রভেদ ধরা যায়, তাকে স্বনজাতি বলে। সুরের দুটি মাত্র প্রাচল—প্রাবল্য ও তীক্ষ্ণতা; স্বরের ক্ষেত্রে স্বনজাতি তৃতীয় প্রাচল। অর্কেস্ট্রা বা বাদ্যসমাবেশে

ঐকতানের মধ্যে থেকে ভিন্ন ভিন্ন বাজনা চিনে নেওয়া বা গলা শুনেই বন্ধু বা গায়কের কণ্ঠপরিচিতি স্বনজাতির কল্যাণেই সম্ভব। আমরা দেখেছি যে, প্রাবল্য ও তীক্ষ্ণতা দুয়ের কোনটিই সরল প্রকৃতির নয়—ভৌত ও মনস্তাত্ত্বিক নানা প্রভাব দিয়ে নিয়ন্ত্রিত ; স্বনজাতি আরও বেশী জটিলতাযুক্ত স্বরবৈশিষ্ট্য।

সাধারণভাবে বলা যায় যে, স্বনকের স্পন্দনবৈশিষ্ট্যের ওপর স্বরজাতি বা গুণ নির্ভর করে। স্পন্দন সরল দোল-জাতীয় হতে পারে ; তখন একটিমাত্র কম্পাংকের শব্দ হয়, তাকে সুর বলে। এইজাতীয় স্পন্দন খুবই বিরল। স্বনকের মধ্যে একমাত্র মৃদুভাবে, উত্তেজিত সুরশলাকার স্পন্দনই এইজাতীয়। বাস্তব স্পন্দনমাত্রেই অনেক বেশী জটিল—অনেকগুলি কম্পাংকের স্পন্দন একযোগে হয় (12.6 চিত্র তার একটি সরল উদাহরণ)। উৎপন্ন সুরগুলির সমাপতনে মিশ্র বা জটিল সুর অর্থাৎ স্বরের সৃষ্টি হয়। এই সুরেলা শব্দে নিম্নতম কম্পাংকের সুরকে **মূলস্বর** বলে, অন্যগুলি **উপস্বর**। উপসুরের কম্পাংক মূলসুরের ক্ষুদ্র ও সরল গুণিতক হলে, তাকে **সমমেল** বলে। স্বনজাতি তথা সুরবৈচিত্র্যের জন্য দায়ী এই উপসুরেরা। তাদের সংখ্যা এবং আপেক্ষিক প্রাবল্যের ওপর স্বনজাতি প্রধানত নির্ভর করে। তা ছাড়া স্বনপ্রাবল্য ও স্বনতীক্ষ্ণতার ওপরেও স্বনজাতি খানিকটা নির্ভরশীল। নানা ভৌত প্রভাবকের সঙ্গে স্বনজাতির সম্পর্ক নিচে বলা গেল—

ক. **তরঙ্গরূপ** : স্পন্দনজাত তরঙ্গরূপের ওপরই স্বনজাতি প্রধানত নির্ভর করে। 10.20 (b) ও 10.22 চিত্রে দেখ যে, মূলসুরের সঙ্গে একাধিক উপসুরের স্পন্দন যুক্ত হলে, কি-ভাবে স্পন্দনের রূপরেখা তথা তরঙ্গরূপ বদ্‌লায়। স্পন্দনে জটিলতা যত বাড়ে ততই স্বনজাতি বদ্‌লায়, স্বর ততই মধুর ও হৃদয়গ্রাহী হয়।

তবে তরঙ্গরূপ বদ্‌লালেই যে সব সময় স্বনজাতি পাল্টাবে, তা নয়। যেমন আঙ্গিক স্পন্দনগুলির মধ্যে দশাভেদ বদ্‌লালে তরঙ্গরূপ বদ্‌লায় (চিত্র 16.2), কিন্তু স্বনজাতি বদ্‌লায় না। আবার তরঙ্গরূপ অবিকৃত রেখেও স্বনজাতি পাল্টানো সম্ভব ; যেমন—শাব্দ তীব্রতাস্তর বা কম্পাংক বাড়ালে তরঙ্গরূপ অক্ষুণ্ণ থাকে, কিন্তু স্বনজাতি বদ্‌লে যায়।

খ. **প্রাবল্য ও তীক্ষ্ণতা** : যেকোন বাজনা বিশ্বস্তভাবে সংগ্রহণ ক'রে পুনরুৎপাদন করলে মূল বাজনা অবিকৃত থাকে। দেখা গেছে, পুনরুৎপাদনকালে তীব্রতা-স্তর মাত্র 20 db বাড়িয়ে দিলে, কিম্বা রেকর্ড বা টেপের গতিবেগ বদ্‌লে দিলেই উৎপন্ন বাজনার স্বনজাতি বদ্‌লায়

(গ্রামোফোন-রেকর্ডের স্পীড বাড়িয়ে দেখ, গায়কের গলা কত সরু লাগে)। তীব্রতা-স্তর পাল্টালে শব্দপ্রাবল্য, বেগ বদ্‌লালে কম্পাংক তথা তীক্ষ্ণতা, বদ্‌লায়। সুতরাং এদের ওপরেও স্বনজাতি নির্ভর করে।

কোন সুরেলা শব্দের তীক্ষ্ণতা মূলসুরের কম্পাংকের ওপর নির্ভর করে। উপসুরগুলির তুলনায় মূলসুরের তীব্রতা সামান্য হলেও কানে সেই মূলসুর সহজেই ধরা পড়ে। আবার মূলসুর বাদ দিয়ে দিলেও, দেখা যায়, স্বরের তীক্ষ্ণতা অপরিবর্তিত থাকে। কোন সমৃদ্ধ তথা ভরাট কণ্ঠস্বর থেকে দু'-একটি সমমেল বাদ দিলে স্বরের তীক্ষ্ণতা বা জাতি বিশেষ বদ্‌লায় না, অথচ উচ্চ কম্পাংকের সমমেল বাদ গেলে স্বরজাতি বিশেষভাবে প্রভাবিত হয়। আবার মূল বাদ্যযন্ত্রের ক্ষেত্রে মূলসুর ও নিচের দু'-একটি সমমেল বাদ গেলে বাজনার সমমেল বদ্‌লায় কিন্তু তীক্ষ্ণতা অক্ষুণ্ণ থাকে।

আপাতদৃষ্টিতে এইসব আশ্চর্য ঘটনাগুলি কানের পর্দার অরৈখিক প্রতিবেদনের কারণেই ঘটে। যুক্তস্বনের উৎপত্তির বিশ্লেষণে (§১১-৮) বা শ্রুতি-সমমেল (§১১-৭) ব্যাখ্যা করতে গিয়ে আমরা কানের এই বৈচিত্র্যের পরিচয় পেয়েছি ; মূল বা নিম্ন কম্পাংকের সমমেল বাদ গেলে, কানের পর্দার স্পন্দন-বৈশিষ্ট্য এই সুরগুলি পুনঃপ্রতিষ্ঠা করে। তবে পুনঃপ্রতিষ্ঠিত সুরগুলির তীব্রতা তথা স্বনপ্রাবল্য, মূল সমমেলগুলির প্রাবল্য থেকে সম্পূর্ণ ভিন্ন।

গ. **অঙ্গসুরের মধ্যে দশাভেদ :** কোন মিশ্রসুরের উপসুরগুলির মধ্যে দশাভেদ পরিবর্তিত হলে, স্বনজাতি যে বদ্‌লায় না, অথচ তরঙ্গরূপ পাল্টে যায়, তা একটু আগেই বলা হয়েছে। বহু পরীক্ষা-নিরীক্ষান্তে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ এই সিদ্ধান্তে আসেন। প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহস্পন্দিত ছদ যদি স্বনকের কাজ করে, তবে বহুদশা (polyphase) বিদ্যুৎ-ধারাচালিত টেলিফোনের পর্দা থেকে মিশ্রসুর তথা স্বর বেরোয়। লয়েড এবং অ্যাগ্‌ন্যু নামে দুই বিজ্ঞানী এর নানা আঙ্গিক ধারাগুলির মধ্যে ইচ্ছামতো দশাভেদ এনে হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-এর সিদ্ধান্ত সমর্থন করেছেন।

ঘ. **ক্ষণস্বর :** ৩-৫ অনুচ্ছেদে আমরা আলোচনা করেছি যে, পর্যায়বলের ক্রিয়াধীনে স্পন্দন সুরু হলে স্পন্দকের অচির বা ক্ষণস্থায়ী স্ববশ স্পন্দন হয়। এই স্পন্দনে উদ্ভূত স্বরকে আমরা ক্ষণসুর ব'লবো। নানা বাজনায় এদের উপস্থিতি, স্বরে বৈশিষ্ট্য আনে। বেহালা ও সেলো-র ক্ষেত্রে এদের অবদান সেখানেই আলোচিত। ঢাক-জাতীয় ঘাতযন্ত্রে (percussion)

স্বরবৈশিষ্ট্যের জন্য ক্ষণসুরই পুরোপুরি দায়ী। দুই বাত (wind)-যন্ত্রে একই সুর বাজলে এবং দুই যন্ত্রকে আলাদা ক'রে চিনতে হলে আদি ও অন্তের ক্ষণসুর কানে পৌঁছানো চাই।

এসব প্রভাবক ছাড়াও ভিন্ন ভিন্ন বাজনায় মৌলিক সুরক্রম, বাদ্যযন্ত্রের নিজস্ব অনুনাদ-ব্যবস্থা, বাদন-কক্ষের অনুরণন-বৈশিষ্ট্য প্রভৃতিও স্বনজাতিকে প্রভাবিত করে। বাদ্যযন্ত্রে সংস্থানকের ক্রিয়ায় বিশেষ অনুনাদ হয় এবং তার ফলে বাজনায় জোরালো ক্ষণসুর যুক্ত হয়।

১৭-১১. সঙ্গীত সম্পর্কে কয়েকটি সংজ্ঞা :

মনস্তাত্ত্বিক বলেন যে, মানুষ কথা বলতে শেখার আগে থেকেই সুরের সমঝদার ছিল। গান-বাজনায় মানুষের প্রীতি ও অনুরাগ তাই সর্বজনীন, সর্বকালীন। দেশ ও ভাষার প্রাচীর ডিঙিয়ে আজ তাই সঙ্গীতের মাধ্যমে মানুষের মধ্যে আত্মিক যোগাযোগ গড়ে উঠছে। পরীক্ষায় দেখা গেছে—দুগ্ধপোষ্য শিশু, জীবজন্তু, এমন-কি জলের মাছও সঙ্গীতবশ। কৃষ্টির জগতে তাই গান-বাজনার গুরুত্ব অসামান্য। আমরা সঙ্গীতপ্রকরণ সম্বন্ধে কয়েকটি সংজ্ঞা এখানে পদার্থবিদের দৃষ্টিকোণ থেকে আলোচনা ক'রবো।

পদার্থবিদ্যায় স্বন-তীক্ষ্ণতা মোটামুটিভাবে স্বনকের কম্পাংক দিয়েই নির্দিষ্ট হয়। সঙ্গীতশাস্ত্রে কিন্তু তীক্ষ্ণতা-নির্দেশের রীতি ভিন্ন—স্বরগ্রামের সাহায্যে তীক্ষ্ণতা নির্দিষ্ট হয়। **স্বরগ্রাম কোন এক মূলসুর-সাপেক্ষে তীক্ষ্ণতার আনুপাতিক বৃদ্ধির এক সুনির্দিষ্ট ক্রম বা স্কেল।** এই মূলসুরকে প্রামাণ্য বা সূচনা-সুর বা সুরকুঞ্চিকা (key-note) বলে। পদার্থবিদ্যায় 256 হার্ৎজকে প্রামাণ্য সুর ধরা হয়; সঙ্গীতশাস্ত্রে সুরকুঞ্চিকা 264 নির্দিষ্ট করা হয়েছে।

ক. **স্বর-অন্তর** (Musical interval) : স্বরগ্রামে সুরের প্রকৃত কম্পাংকের মান অ-দরকারী; কেননা সুর থেকে সুরান্তরে গেলে তাদের কম্পাংকভেদ স্বীকৃত হয় না, তাদের অনুপাতই কানে ধরা পড়ে। **কোন দুই সুরের কম্পাংকের অনুপাতই তাদের স্বর-অন্তর।** দুই সুরের কম্পাংক সমান হলে, তাদের **সমান্বিত** (in unison) বলে। প্রকৃত কম্পাংক যাই হোক না কেন, দুই সুরের কম্পাংকের অনুপাত 2 : 1 হলে, তাদের স্বর-অন্তর এক অষ্টক, আর 2 : 3 হলে, পঞ্চম বলা হয়।

যদি P, Q, R তিনটি ক্রমহ্রাসমান কম্পাংকের সুর হয়, তাহলে তাদের মধ্যে স্বর-অন্তর যথাক্রমে n_P/n_Q এবং n_Q/n_R, এবং P ও R-এর মধ্যে স্বর-অন্তর হয়

$$\frac{n_P}{n_R}=\frac{n_P}{n_Q}\cdot\frac{n_Q}{n_R} \qquad (১৭\text{-}১১.১)$$

$$\therefore \quad \ln\frac{n_P}{n_R}=\ln\frac{n_P}{n_Q}+\ln\frac{n_Q}{n_R} \qquad (১৭\text{-}১১.২)$$

অর্থাৎ দুই স্বরের অন্তর তাদের অন্তর্বর্তী অন্তরগুলির গুণফল এবং যেকোন অন্তরের স্বাভাবিক লগারিদ্‌ম্‌ (ln) অন্তর্বর্তী অন্তরগুলির স্বাভাবিক লগারিদ্‌মের সমষ্টি মাত্র।

খ. সুরসঙ্গতি ও সুরবিক্ষোভ : একাধিক সুর কানে পৌঁছে যদি মোলায়েম ও প্রীতিপ্রদ অনুভূতির উদ্রেক করে, তাহলে তাদের মধ্যে সুরসঙ্গতি আছে বলা হয় ; আর যদি তাদের ক্রিয়া বিরক্তিকর বা রুক্ষ অনুভূতি জাগায়, তাহলে তাদের মধ্যে সুরবিক্ষোভ, সুরবিরোধ বা সুরানৈক্য আছে ধরা হয়। সুর বা তান সম্পর্কিত সব অনুভূতির মতো সুরসঙ্গতি ও সুরবিক্ষোভের কারণও কিছুটা ভৌত, কিছুটা মনস্তাত্ত্বিক। এদের উৎপত্তি-বিশ্লেষণে, হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-এর দীর্ঘ এবং অনলস গবেষণা প্রথম সার্থকতা আনে। পরবর্তী কালে অন্যান্য গবেষকদের কাজ তাঁর গবেষণাকে সমর্থিত ও বিস্তারিত করেছে।

দুই স্বর এককালে উৎপন্ন হলে, তাদের উচ্চতর উপসুরগুলির মধ্যে স্বরকম্পের উৎপত্তি হওয়ার সম্ভাবনা থাকে। অনেকক্ষেত্রেই তার ফলে সম্মিলিত অনুভূতি বিঘ্নিত ও খণ্ডিত হয়। তখন মোট শব্দসমষ্টিতে সন্ততি ভেঙ্গে গিয়ে কয়েকটি ঘাতসুরের (pulses of tones) উৎপত্তি হয় ; এই খণ্ডিত ঘাতসুরের ক্রিয়ায় কানে রুক্ষ এবং রূঢ় অনুভূতি জাগে। এই ঘটনাই সুরবিক্ষোভ। তবে উপসুরগুলির কম্পাংক কতকগুলি সুনির্দিষ্ট অনুপাতে থাকলে, হয় স্বরকম্প মোটেই হয় না, নয়তো এত দুর্বল হয় যে, মিলিত শব্দে মোটেই রুক্ষতা থাকে না। এই ক্ষেত্রবিশেষগুলিই সুরসঙ্গতি বা ঐকতান।

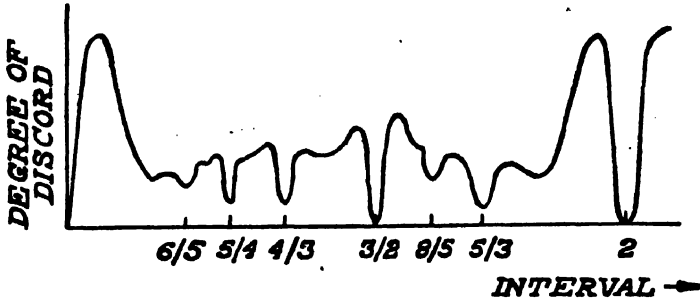
আঙ্গিক সুরগুলির কম্পাংকের ওপর সুরবিরোধী স্বরকম্পের সংখ্যা নির্ভর করে। মোটামুটি হিসাবে 250 থেকে 500 চক্র/সে কম্পাংকের মধ্যে

মেয়ার-এর আহরিত স্বরকম্প ও সুর-বিক্ষোভ সারণী

নিম্নতর সুর-কম্পাংক	সেকেণ্ডে স্বরকম্পের সংখ্যা	
	চূড়ান্ত সুরবিক্ষোভ	রুক্ষতা অপসৃত
64	6.4	16
128	10.4	26
256	18.8	47
384	24.0	60
512	31.2	78
640	36.0	90
768	43.6	109
1024	54.0	135

33 সংখ্যার স্বরকম্পে সুরবিক্ষোভ চরম শোনায় ; স্বরকম্পের সংখ্যা 6-এর ওপরে হলেই সুরবিরোধ সুরু হয়, 33-এর ওপরে কমতে সুরু করে, 60-এর মতো হলে তখন রূঢ় অনুভূতি মিলিয়ে যায়। ওপরে মেয়ার-এর আহরিত সারণীতে নিম্নতর কম্পাংক সাপেক্ষে স্বরকম্প এবং সুরবিক্ষোভের মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। চোখে সবিরাম বা স্পন্দী (flickering) আলো পড়লে যেমন অস্বস্তি হয়, সুরবিক্ষোভের ক্ষেত্রে কানেও সেইরকম বিরক্তিকর অনুভূতি বোধ হয়।

সুরেলা শব্দমাত্রেই প্রকৃতিতে জটিল এবং সাধারণত সমমেলসমৃদ্ধ হয়। দুই সমমেলশ্রেণীর মধ্যে স্বরকম্প হলে, সুরে রুক্ষতা আসে। আঙ্গিক সুরগুলির মধ্যে যদি অষ্টকপরিমাণ সুর-অন্তর থাকে তাহলেই স্বরকম্পাংক মূলসুরের অখণ্ড গুণিতক হয়—তখন আর সুরবিক্ষোভ থাকে না। তাই অষ্টকভেদে সম্পূর্ণ ঐকতান ঘটে। অষ্টকের চেয়ে সুর-অন্তর কম হলে, পূর্ণ ঐকতান হয় না। 17.28 চিত্রে এক অষ্টকের মধ্যে সুর-অন্তর এবং সুরবিক্ষোভের মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। দেখা যাচ্ছে যে, সুর-অন্তর 1, 1.5 এবং 2 হলে, সুরবিক্ষোভ থাকেই না, যদিও ঐ মানগুলির অব্যবহিত আগে বা পরেই সুরবিক্ষোভ খুব বেশী। সাধারণভাবে বলা যায় যে, স্বরকম্প না থাকলে বা তাতে প্রাবল্যভেদ মূলসুরগুলির তুলনায় খুব ক্ষীণ হলে, সমমেলশ্রেণীর মধ্যে সুরসঙ্গতি ঘটে। তবে উচ্চগ্রামের অষ্টকে সুরসঙ্গতি হলেই যে নিম্নগ্রামের অষ্টকেও তা হবে, এমন

কোন কথা নেই। সুরবিক্ষোভ—দুই সুরের মধ্যে অন্তর এবং তাদের মধ্যে সম্ভাব্য স্বরকম্প, এই দুয়ের যৌথ ক্রিয়ার ওপর নির্ভর করে। এই স্বরকম্প দুই আঙ্গিক সুর কিম্বা দুই মৌলিক স্বরের উপসুরগুলির উপরিপাতনে হতে পারে ;

চিত্র 17.28—সুর-অন্তর ও সুরবিক্ষোভ

অর্থাৎ দুটি স্বরের মধ্যে সুরবিক্ষোভ তাদের স্বনজাতির ওপর নির্ভর করে। যুগ্মস্বনের বেলায় দুই মৌলিক সুর বা একটি মৌলিক এবং আর-একটি উচ্চতর সুরের মধ্যে স্বরকম্প, সুরবিক্ষোভ ঘটাতে পারে।

সংক্ষেপে বলা যায় যে, সুর-অন্তর ছোট, অখণ্ড সংখ্যার অনুপাত হলে সুরসঙ্গীত ঘটে। সংখ্যাগুলি যত ছোট, সুরসঙ্গীতও তত ভালো। মিশ্রসুরের বেলায়, তাদের মূলসুর বা উপসুরগুলির মধ্যে স্বরকম্প ঘটলে এবং তাদের মধ্যে প্রাবল্যভেদ জোরালো হলে, অপ্রীতিকর সুরবিক্ষোভ ঘটে। হেল্‌মৃহোল্‌ৎজ-এর মতে, স্বরকম্পের সংখ্যা 30 থেকে 130-এর মধ্যে হলে বিরক্তির কারণ হয়।

তবে সুরসঙ্গীত ও সুরবিক্ষোভের বিচারে মানসিক গ্রাহিতার প্রশ্ন আসে। পুরোনো বিচারমতে যা উচ্চগ্রামের সুরবিক্ষোভ, বর্তমান সঙ্গীতে তা গ্রহণযোগ্য। পরিবর্তিত অশান্ত ও বিক্ষোভপ্রিয় মানসিকতার যুগে Jazz-এর মতো রুক্ষ এবং উগ্র ঝংকারের বাজনা অনেকেরই পছন্দ।

গ. মেল ও তান : প্রাচীন গ্রীকরা লক্ষ্য করেছিলেন যে, স্পন্দনশীল তারের দুই অংশের দৈর্ঘ্য-অনুপাত অখণ্ড ক্ষুদ্রসংখ্যার আনুপাতিক হলে (অর্থাৎ 1 : 2, 2 : 3, 3 : 4 ইত্যাদি), উৎপন্ন স্বরে সুরসঙ্গীত থাকে। 4 : 5 : 6 কম্পাংকের সুরসমন্বয়কে ত্রিস্বন (triad) বলে। অষ্টক এবং ত্রিস্বন মিলেই সব সুরসঙ্গীতের উৎপত্তি। যখন ত্রিস্বন আর তার মূলসুরের অষ্টক

ধ্বনিত হয় তখন স্বরসঙ্গতি (chord) ঘটে। সুতরাং একাধিক সুর একযোগে ধ্বনিত হলে, সুরেলা শব্দ-উৎপাদনে সুরসঙ্গতি একান্তই প্রয়োজন। কাজেই স্বরগ্রামে সুরকম্পাংক এমনভাবে সাজানো চাই, যাতে তাদের সম্মিলিত ক্রিয়ায় স্বরসঙ্গতি হয়। স্বরসঙ্গতির ফলে যে প্রীতিপ্রদ অনুভূতি হয়, তাকে **মেল** (harmony) বলে। পাশ্চাত্য ধ্রুপদী সঙ্গীতে ত্রিস্বন এবং স্বরসঙ্গতি-ভিত্তিক মেলের প্রাধান্য বেশী। ভারতীয় সঙ্গীতে মেলের ওপর তানকে (melody) স্থান দেওয়া হয়েছে। তানে প্রীতিপ্রদ ক্রমিক সুরের সমন্বয় ঘটানো হয়।

তাহলে গ্রহণযোগ্য স্বরগ্রামে এমন সব সুর থাকা চাই, যারা মেল ও তান দুইই উৎপন্ন করতে পারে। দুয়ের সর্ত এক নয়, একের সর্ত অন্যের উপযোগী নাও হতে পারে।

১৭-১২. স্বরগ্রাম :

আগেই বলা হয়েছে যে, স্বরগ্রাম এমন এক কম্পাংকক্রম যার উচ্চতর কম্পাংকগুলি এক সূচনা-সুরের সাপেক্ষে নির্দিষ্ট সাংখ্য-অনুপাত। কম্পাংক-অনুপাত এমনভাবে নির্বাচিত যে, তারা মেল বা তান উৎপন্ন ক'রে প্রীতিপ্রদ সুরেলা শব্দের সৃষ্টি করে। দু'রকমের স্বরগ্রাম প্রচলিত—স্বভাবী এবং সমীকৃত। দুই ক্রমেই কম্পাংকপাল্লা এক অষ্টক—প্রথমটিতে সুর-অন্তর 7টি, দ্বিতীয়ে 12টি ; সুর-অন্তরগুলি প্রথমটিতে অসমান, দ্বিতীয়ে সমান।

ক. স্বভাবী স্বরগ্রাম (Diatonic Scale) : সূচনা-সুর আর তার অষ্টকের মধ্যে ছয়টি সুর সন্নিবিষ্ট ক'রে অষ্টক-মধ্যে **সপ্ত স্বর-অন্তর** সৃষ্টি ক'রে এই স্বরগ্রাম রচিত। এই সুর-অন্তরগুলি এমনভাবে নির্বাচিত যে, তারা নিজেদের মধ্যে এবং অষ্টকের দুই প্রান্তীয় সুরের মধ্যে সুরসঙ্গতি ঘটায়। ভারতীয় পদ্ধতিতে তাদের নাম ষড়্জ, ঋষভ, গান্ধার, মধ্যম, পঞ্চম, ধৈবত ও নিষাদ, সংক্ষেপে সা, রে, গা, মা, পা, ধা, নি ; পাশ্চাত্য সংকেতে *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *A*, *B*—যথাক্রমে ডো, রে, মি, ফা, সল, লা, সি ; এক অষ্টকের শেষ সুর পরের অষ্টকের প্রথম সুর। নিচের তালিকায় এদের নাম, আনুপাতিক কম্পাংক এবং সুর-অন্তর নির্দেশ করা হয়েছে। এখানে সূচনা-সুর 256 কম্পাংক ধরা হলেও, তার যেকোন মানই (যথা 264/সে) গ্রাহ্য।

সঙ্গীত-প্রকরণ ও সুর-অন্তর : স্বভাবী স্বরগ্রাম

প্রতীক	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*A*	*B*	*c*
পাশ্চাত্য ভারতীয়	*DO* সা	*RE* রে	*MI* গা	*FA* মা	*SOL* পা	*LA* ধা	*SI* নি	*do* সা'
আনুপাতিক কম্পাংক	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
সুর-অন্তর		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
$C=256$ ভিত্তিতে কম্পাংক	256	288	320	341	384	427	480	512
আনুপাতিক কম্পাংক	24	27	30	32	36	40	45	48

এই নামকরণের ব্যাখ্যা এইভাবে করা যায়—d বলতে D কম্পাংকের এক অষ্টক ওপরের সুর বোঝায়। সূচনা-সুর সাপেক্ষে D-র কম্পাংক 9/8 ; তাহলে d-র কম্পাংক হবে সূচনা-কম্পাংকের $2\times 9/8$ গুণ। পদার্থবিদের হিসাবে তা হবে $(9/4\times 256)$ বা 576, আর সঙ্গীতবিদের মতে $(9/4\times 264)$ বা 594 চক্র/সে।

স্বরগ্রামে সাতের বেশী অষ্টকের দরকার হয় না, আর সেই কম্পাংক-পাল্লা 32 থেকে 4000 পর্যন্ত বিস্তৃত। সাধারণত তিনটি অষ্টকই যথেষ্ট। আধুনিক চিহ্নপ্রকরণে সাতটি অষ্টক 1 থেকে 7 পর্যন্ত নিম্নাক্ষর দিয়ে সূচিত হয় ; কাজেই নিম্নতম অষ্টক C_1 থেকে C_2 পর্যন্ত এবং ঊর্ধ্বতম অষ্টক C_7 থেকে C_8 পর্যন্ত ব্যাপৃত। পাশ্চাত্য সঙ্গীতে A_4-এর কম্পাংক (440 চক্র) প্রামাণ্য ব'লে চিহ্নিত হয়েছে, তাতে $C_1=32.703$, $C_4=261.63$ এবং $C_8=4186.0$ চক্র/সে হয়ে দাঁড়িয়েছে।

সম্ভবত সুরসঙ্গীত ও সুরবিক্ষোভের ভিত্তিতেই স্বভাবী স্বরগ্রাম উদ্ভাবিত হয়েছিল। মেলবন্ধনে এর সুবিধা এত বেশী যে, অন্য কোন স্বরগ্রামই এর বিকল্প হতে পারেনি। কিন্তু এর মস্ত অসুবিধা যে, ইচ্ছামতো এর সূচনা-সুর বদ্‌লানো যায় না ; বদ্‌লালে এবং সুর-অন্তর মেনে চললে উদ্ভূত নতুন সুরগুলি স্বরগ্রামে পড়বে না ; তাই বলি, স্বভাবী স্বরগ্রামের ভেদন (modulation) ক্ষমতা নেই। অথচ আধুনিক সঙ্গীতে এই পরিবর্তন সদাই দরকার। এই অসুবিধা অতিক্রম করতে গিয়ে অন্য স্বরগ্রাম উদ্‌ভাবিত হয়েছে।

খ. সমীকৃত (Tempered) স্বরগ্রাম : এখানে এক অষ্টকের মধ্যে 12টি সুর সন্নিবিষ্ট—তাদের মধ্যে অন্তরগুলি সমান এবং সেই অন্তরগুলিকে অর্ধসুর (semitone) বলে। দুই ক্রমিক সুরের মধ্যে কম্পাংক ভেদ X ধরলে $X^{12}=2$ বা $X=2^{1/12}=1.059463$ দাঁড়ায়। দুই স্বরগ্রামে সুর-অন্তরের তুলনা নিচের সারণীতে দেওয়া হ'ল—

স্বভাবী ও সমীকৃত স্বরগ্রামে সুরান্তরের তুলনা

	DO		*RE*		*MI*	*FA*		*SOL*		*LA*		*SI*	*do*
স্বভাবী	1		1.125		1.250	1.333		1.500		1.667		1.875	2
সমীকৃত	1	*	1.122	*	1.260	1.335	*	1.498	*	1.682	*	1.883	2

দেখা যাচ্ছে যে, সুর-অন্তরগুলির তফাৎ সর্বত্রই 1%-এরও কম ; কাজেই স্বভাবী স্বরগ্রামের সুরসঙ্গতি সমীকৃত স্বরগ্রামেও পাওয়া সম্ভব।

ওপরের সারণীতে তারকা-চিহ্নিত ফাঁকে ফাঁকে পাঁচটি নতুন সুর সন্নিবিষ্ট। এতে সুবিধা এই যে, এদের মধ্যে যেকোন সুরকেই সূচনা-সুর ধরা যায় এবং তখনও সুরসঙ্গতি অক্ষুণ্ণ রাখার মতো সুর-অন্তর বজায় থাকে। স্বরনিবেশের (temperament) সব সর্তই এই স্বরগ্রামে পালিত হয়। পিয়ানো, হার্মোনিয়ম প্রভৃতি যন্ত্রে সুর-অন্তর যেখানে অপরিবর্তনীয়, সেখানে সমীকৃত স্বরগ্রাম অপরিহার্য।

১৭-১৩. বাদ্যযন্ত্র :

গান গাইতে শেখার আগেই, বোধ হয়, মানুষ বাজনা বাজাতে জানতো। শিকারীর ধনুষ্টংকার বা গাছের ফাঁপা গুঁড়িতে আঘাত ক'রে শব্দসংকেত-প্রেরণের মাধ্যমেই, বোধ হয়, এই চেতনার উদ্‌বোধন। ১৫ অধ্যায়ে আমরা সাধারণ স্বনকের মধ্যে বাদ্যযন্ত্রের আলোচনা করিনি, কেননা সুরেলা শব্দের বৈচিত্র্যগুলি জেনে নিয়ে তাদের আলোচনাই প্রশস্ত। মোটামুটিভাবে তার ও ঝিল্লীর অনুপ্রস্থ স্থাণুস্পন্দন এবং বায়ুস্তম্ভের অনুদৈর্ঘ্য স্থাণুকম্পনই বাদ্যযন্ত্রগুলির স্বনভিত্তি। সুতরাং সেই ক্রমেই তাদের ততযন্ত্র, ঘাতযন্ত্র এবং বাতযন্ত্র এই তিনরকম শ্রেণীতে ভাগ করা যায়। প্রথম ও তৃতীয় শ্রেণীর যন্ত্রে

বৈচিত্র্য অসংখ্য। মাঝের শ্রেণীতে যন্ত্র সীমিতসংখ্যক কিন্তু তাদের থেকে উৎপন্ন শব্দগুলিকে সঠিক বিচারে সুরেলা বলা অনুচিত। আমরা প্রতি শ্রেণীর মুখ্য পরিচায়ক হিসাবে কয়েকটি মাত্র যন্ত্রের সংক্ষিপ্ত আলোচনা ক'রবো—ততযন্ত্রের মধ্যে সেতার, পিয়ানো, বেহালা; ঘাতযন্ত্রের মধ্যে তবলা; বাতযন্ত্রের মধ্যে বাঁশী, অর্গ্যান আর হার্মোনিয়ম।

১৭-১৪. ততযন্ত্র (Stringed instruments):

স্মরণাতীত কাল থেকে তারের বাদ্যযন্ত্র মানুষের সঙ্গীতপিপাসা মিটিয়ে আসছে—তার গুরুত্ব অম্লান, ব্যবহার বহুল। প্রাচীন মিশরীয়, অ্যাসিরীয় গ্রীক ও ভারতীয় ছবিতে, মুদ্রায়, লেখায় বীণার পরিচয় অনেকই মেলে। আধুনিক ততযন্ত্রে ভিন্ন ভিন্ন দৈর্ঘ্য ও ভরের তারের ওপর ভিন্ন ভিন্ন টান প্রয়োগ ক'রে বাজনা বাজানো হয়; সুর তুলতে, তারকে টংকার দিয়ে, আঘাত ক'রে বা ছড় টেনে বিচলিত করা হয়। তারগুলি অতি সামান্য পরিমাণ বায়ুকে বিচলিত করতে পারে; সুতরাং শক্তির বিকিরণ অর্থাৎ শব্দপ্রাবল্য সামান্যই। শব্দপেটি ব্যবহার ক'রে প্রাবল্য অনেক বাড়ানো যায়।

ক. টংকার: বীণা-জাতীয় যন্ত্র প্রাচীনতম বাদ্য। বীণাতে প্রতিটি সুরের জন্য একটি ক'রে তার থাকে। অন্যান্য যন্ত্রে—যেমন একতারা, দোতারা প্রভৃতিতে তারের সংখ্যা কম। সেইসব যন্ত্রে একই তারের কম্পনশীল দৈর্ঘ্য বদল ক'রে ভিন্ন ভিন্ন সুর বাজানো হয়। নানারকম অনুনাদী ব্যবস্থা ক'রে শব্দের জোর বাড়ানো হয়।

ভারতে **সেতার** খুবই জনপ্রিয়; এর বাজনা মধুর, সমৃদ্ধ এবং ঝংকার-পূর্ণ। মোটামুটিভাবে তার দুটি অংশ—আংশিকভাবে শূন্য একটি করাসন, আর হাতির দাঁতের সেতু-দেওয়া ফাঁপা, গোল পেটিকা; তামা ও ইস্পাতের সাতটি তার করাসনের ওপর টানা-দেওয়া থাকে। ওপরদিকে কয়েকটি মুণ্ডিতে তারগুলি প্যাঁচানো থাকে। এদের পেঁচিয়ে তারের ওপর টান বদ্‌লানো এবং সুরবন্ধন বদ্‌লানো যায়। করাসনের ওপর অনেকগুলি ধাতুর বাঁকা রড্ আড়াআড়িভাবে রাখা থাকে; তাদের **ফ্রেট** বলে। বাজানোর সময় বাদক এক হাতের আঙুল দিয়ে তারকে ফ্রেটের গায়ে চেপে ধরেন আর অন্য হাতের আঙুল দিয়ে তারের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দুতে টংকার দিয়ে তারের স্পন্দনী-দৈর্ঘ্য বদল ক'রে ক'রে সুর তোলেন। এ-ছাড়াও সেতুর ফুটো দিয়ে টানা আরও সরু সরু 11টি তার থাকে। তারের পেটিকা এবং তার ভেতরে বায়ুর

পরবশ ও অনুনাদী কম্পনও সেতারের সুরবৈচিত্র্য এবং শব্দপ্রাবল্য বাড়ায়। আঙুলের বদলে সূচাগ্র তারের মেরজাপ দিয়েও টংকার তোলা হয়; তাতে বিচলিত-তারের রূপ 12.8 চিত্রের মতো হয়। এতে উপসুরের সংখ্যা আরও বেড়ে সুরসমৃদ্ধি ও বৈচিত্র্য আরও বাড়ায়। রবার, সরোদ, গীটার (৬ তার), তানপুরা (৪ তার), ব্যাঞ্জো—সেতারশ্রেণীরই যন্ত্র। সেতার প্রাচীন ভারতে **সপ্ততন্ত্রী বীণা** এবং রবার 'রুদ্রবীণা' নামে পরিচিত ছিল।

খ. আঘাত ঃ টানা-দেওয়া তারকে শক্ত বা নরম হাতুড়ি দিয়ে আঘাত ক'রে যেসব যন্ত্রে সুর তোলা যায়, তাদের মধ্যে **পিয়ানো** প্রধান। যন্ত্রটিতে উৎপন্ন শব্দ খুব জোর হলে, তাকে **পিয়ানোফোর্টে** বলে। এই যন্ত্রে বহু ইস্পাতের তার থাকে। স্বরগ্রামের প্রতিটি সুরের জন্য এক বা একাধিক তার, দুই সেতুর মধ্যে স-টান অবস্থায় থাকে। এদের মধ্যে এক সেটু তার, শাব্দপীঠের ওপর স-টান এবং অপর সেটু যন্ত্রটির ফ্রেমে আটকানো থাকে। পিয়ানোর চাবি টিপলেই নরম ফেল্টে ঢাকা হাতুড়ি, তারকে ঘা মেরে বাজায়; চাবি থেকে আঙুল তুলে নিলেই আর-একটি ফেল্টের প্যাড তার-গুলিকে ছুঁয়ে থামিয়ে দেয়। এই অবদমক নিষ্ক্রিয় থাকলে তারের স্পন্দন তথা শব্দ, স্বাভাবিক হারে কমে। প্রতিটি উচ্চ কম্পাংকের জন্য সরু, ছোট, জোর টানে রাখা তিনটি ক'রে, তার থাকে। নিম্ন কম্পাকের তারগুলিকে ভারাক্রান্ত ক'রে তাদের রৈখিক ঘনত্ব বাড়ানো হয়। সপ্তম ও নবম উপসুরগুলি সুরবিক্ষোভ ঘটায়; তাই তাদের এড়াতে সেতু থেকে তারের দৈর্ঘ্যের সপ্তমাংশ থেকে নবমাংশের মধ্যবর্তী বিন্দুতে আঘাত করা হয়। শব্দাসনের কাজ প্রাবল্য-বাড়ানো; সেটি প্রতিটি তারের মূল এবং উচ্চতর স্পন্দনরীতিতে স্পন্দিত হতে পারে। আসনটি আকারে বিস্তৃত হওয়ায় অল্প কম্পাংকেও যথেষ্ট শক্তি বিকিরিত হয়।

গ. ছড়-টানা তন্ত্রী ঃ এসরাজ, **বেহালা**, সারেঙ্গী প্রভৃতি এই শ্রেণীর বাদ্যযন্ত্র। বেহালাতে চারটি সমান দৈর্ঘ্যের তার থাকে কিন্তু তাদের রৈখিক ঘনত্ব আলাদা আলাদা; তা ছাড়া প্রযুক্ত টানও আলাদা আলাদা। তারগুলি করাসনের ওপরে দুটি স্যাড্‌লের মধ্যে আটকানো থাকে; তাদের ওপরটিকে ব্রিজ, তলারটিকে নাটু বলে। শব্দপেটির আকার এমন থাকে যাতে অবাধে ছড় টানা যায়; তারের দু'ধারে ∫ আকারের দুটি ছিদ্র থাকে। তারগুলি সেতারের মতোই খুঁটিতে বাঁধা থাকে। পেটি আর তার ভেতরের বায়ুর পরবশ কম্পন শব্দের প্রাবল্য বাড়ায়। প্রধানত পেটির ওপরের আর নিচের অংশের

স্পন্দনেই শব্দের উৎপত্তি হয় ; শব্দদণ্ড নামে কাঠের একটি টুক্‌রা দুই অংশের মধ্যে যোগসূত্র রচনা করে। ব্রিজের মারফতেই স্পন্দিত তার ও পেটির বায়ুর মধ্যে শাব্দযোজন ঘটে। মুণ্ডিতে প্যাঁচ দিয়ে তারে টান এবং সুরকম্পাংক পাল্টানো হয়। স্পন্দনশীল তারের ভিন্ন ভিন্ন বিন্দু আঙুলে চেপে ধ'রে (সেতারে ফ্রেটের মতো) তার দৈর্ঘ্য তথা স্পন্দনাংক বদ্‌লানো হয়। এই যন্ত্রে চার অষ্টকের মতো সুরবিস্তার সম্ভবপর। পেটির মধ্যে বায়ুর কম্পন, তারের স্পন্দনের নিকটতম অনুগামী এবং অন্য যেকোন অংশের তুলনায় জটিলতর।

বেহালার সুরসম্পদ তত্ত্ববহির্ভূত বহু কিছুর ওপর নির্ভর করে ; যথা—তারের ভর, দৈর্ঘ্য, বেধ, ছড়ের চাপ, তন্ত্রীসংখ্যা, প্রয়োগবিন্দু, ব্যবহৃত কাঠের তন্তু—তার গঠন, বেধ ও বয়স, এমন-কি তার পালিশ এবং বার্নিশ। এই যন্ত্রের স্বরবৈশিষ্ট্যের তাত্ত্বিক গবেষণায় বহু ফাঁক রয়েছে। ১৭শ শতাব্দীতে প্রস্তুত Stradivarius বেহালাগুলি সুরসমৃদ্ধিতে শ্রেষ্ঠ, কিন্তু তার গঠনশৈলী, স্পন্দনরীতি এবং তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা আজও অনায়ত্ত।

১৭-১৫. ঘাতযন্ত্র (Percussion instruments) :

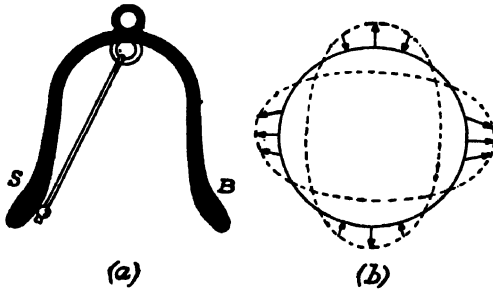
বাঁয়া-তবলা, ঢাক-ঢোল, মৃদঙ্গ, দামামা, দুন্দুভি, কাড়া-নাকাড়া প্রভৃতি এই শ্রেণীর বাদ্যযন্ত্র। এতে স-টান ছদ দিয়ে ঢাকা বায়ুগহ্বর থাকে। ছদ ও গহ্বরস্থ বায়ুর **যোজিত স্পন্দন** এখানে শব্দসৃষ্টির কারণ। সঠিক বিচারে এদের সুরেলা স্বনকের পর্যায়ে ফেলা চলে না, কেননা ছদের ওপর **সবিরাম আঘাতে** শব্দ উৎপন্ন হয়—স্বভাবতই সে-শব্দ স্থায়ী বা নিয়মিত নয়। এদের বরং পর্যাবৃত্ত অপসুর বলা চলে। উৎপন্ন শব্দবৈশিষ্ট্য, আঘাতে উৎপন্ন ক্ষণসুরের ওপর বিশেষভাবে নির্ভর করে। সে কথা আগেও বলা হয়েছে। এরা সুর-সমন্বয়ে যতি ও বৈচিত্র্য আনে—এদের তাল-রক্ষক (rhythm-marker) বলা চলে ; সুরোৎসারী বলা যায় না।

তবলাতে পিপের আকারের এক-মুখ-বন্ধ কাঠের বেলনের ওপর স-টান ছদ থাকে। কয়েকটি দড়ি ও ছোট ছোট কাঠের বেলন ব্যবহার ক'রে এই টান বদ্‌লানো যায়। লোহচূর্ণ-মেশানো আটার মোটা স্তর ছদের মাঝামাঝি জায়গায় লাগিয়ে তাকে ভারাক্রান্ত করা হয় ; স্তরটি আবার মাঝের দিকে মোটা, কিনারার দিকে ক্রমে পাতলা হয়ে গেছে। তার ফলে ছদের স্পন্দনে কেবল সমমেলই থাকে, উপসুর আর থাকে না। তাই তবলাকে সুরোৎসারী মনে করা

চলে। তার ছদের স্পন্দনাংক এবং উৎপন্ন শব্দের প্রকৃতি, প্রান্তিক টানের ওপর নির্ভর করে, কাজেই তারা অচর নয়। বাঁয়াতে বায়ুগহ্বর বড় একটা বাটির মতো; এর ভারাক্রান্ত অংশ একপেশে, অতএব ছদের ওপর ভার অপ্রতিসম। বাঁয়া-তবলাতে আঙুলের টোকায় শব্দোৎপত্তি হয়।

দুন্দুভি, দামামা, কাড়া-নাকাড়া, ঢাক প্রভৃতিতে বড় পাত্রে চামড়ার আচ্ছাদন থাকে। তাকে কাঠি বা মুগুর দিয়ে মেরে বাজানো হয়। এদের একটি স্বকীয় প্রবল মূলসুর থাকে। যদি নরম হাতুড়ি দিয়ে কেন্দ্র ও পরিধির মাঝামাঝি জায়গায় আঘাত করা যায়, তাহলে কেবলমাত্র প্রবল মূলসুরই শোনা যায়, অপসুর থাকে না বললেই হয়। এইসব যন্ত্রে বায়ুগহ্বর শুধু যে অনুনাদ ঘটিয়ে শব্দ বাড়ায় তা নয়, তার বিশেষ আকৃতি শব্দের চারিদিকে সুষম প্রসারে সহায়তা করে।

ঘণ্টা : ঝিল্লী বা ছদযুক্ত ঘাতযন্ত্রে বায়ুপ্রকোষ্ঠের দরকার হয়। কাঁসর, ঘণ্টা, করতাল, খঞ্জনী এরাও ঘাতযন্ত্র—তারা মোটা ধাতুপাতে তৈরী, সংশ্লিষ্ট বায়ুপ্রকোষ্ঠ লাগে না, নিজেদের আওয়াজই যথেষ্ট। পদার্থবিদ্যার দিক থেকে এদের মধ্যে সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ যন্ত্র—ঘণ্টা। গির্জার ঘণ্টা, মন্দিরের ঘণ্টা, ঘড়িঘণ্টা, গৃহপালিত নানা পশুর গলার ঘণ্টা, পূজায় ব্যবহৃত ছোট-বড় ঘণ্টা—এদের আকারে, আকৃতিতে, শব্দে বৈচিত্র্য অজস্র। যাই হোক, শব্দের গাণিতীয় বিশ্লেষণ কিন্তু, খুবই দুরূহ এবং বেহালার মতো এদেরও সুরবৈচিত্র্য বহু অজানা প্রভাব-নিয়ন্ত্রিত।

র‍্যালে, ক্ল্যাড্নি এবং আরও বহু বিজ্ঞানী এদের নিয়ে বিশ্লেষণ ও গবেষণা

চিত্র 17.29—গির্জার ঘণ্টা ও তার বাদনশৈলী

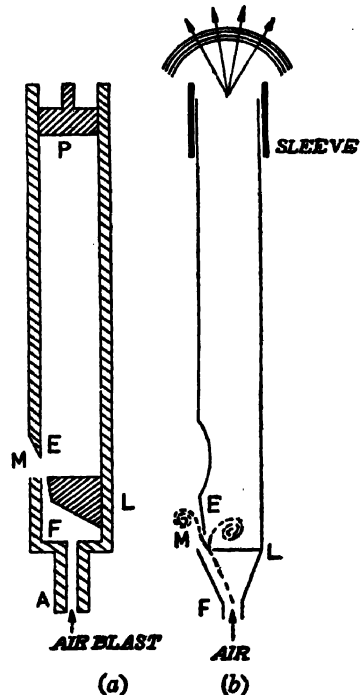
করেছেন, কিন্তু শেষ কথাটি কেউই বলতে পারেননি। ঘণ্টার আকার, আয়তন উপাদান এবং তার সম- বা বিষম-সত্ত্বতা, তৈরির সময়ে তাপীয় এবং যান্ত্রিক

পীড়ন, গরম এবং ঠাণ্ডা করার পদ্ধতি ও কাল সবই উৎপন্ন সুরকে প্রভাবিত করে। গির্জার ঘণ্টাকে (চিত্র 17.29) র‍্যালে ফাঁপা নল এবং বাঁকানো পাতের প্রকারভেদ হিসাবে বিশ্লেষণ করার চেষ্টা করেছেন। এর উপাদান সাধারণত কাঁসা (শতকরা 40 ভাগ তামা, 20 ভাগ টিন) এবং ভেতরে দণ্ডটি আলগাভাবে ঝুলে থাকে। দণ্ডকে নাড়ালে বা ঘণ্টাকে দোলালে, S ও B বিন্দুতে পর্যায়ক্রমে আঘাত হয়; এই জায়গায় বক্রতা ভেতরদিকে উত্তল, বাইরের দিকে অবতল। এদের সুরগুলি বিষমমেল এবং স্থাণুস্পন্দনে নানা বদ্ধ নিস্পন্দরেখার উৎপত্তি হয়। 17.29 (b) চিত্রে মূলসুর বাজার সময়ে নিস্পন্দ-রেখার পরিধিমুখী স্পন্দনরীতি দেখানো হয়েছে।

১৭-১৬. বাতযন্ত্র (Wind instruments):

এই শ্রেণীর যন্ত্রে বায়ুস্তম্ভের একপ্রান্তে নিরবচ্ছিন্ন বায়ুস্রোতের প্রয়োগে সুরেলা শব্দের উদ্দীপন ও পোষণ বজায় রাখা হয়। বায়ুস্তম্ভকে দু'ভাবে আলোড়িত করা হয়—(১) কিনারাতে (edge) বায়ুস্রোতকে বিঘ্নিত ক'রে বা (২) পত্রী (reed)-যোগে স্রোতে বিঘ্ন ঘটিয়ে। ফ্লু-অর্গ্যান-নল, পিকোলো, বাঁশী—এরা প্রথম শ্রেণীর; আর রীড-অর্গ্যান-নল, ক্ল্যারিওনেট, ওবো প্রভৃতি দ্বিতীয় শ্রেণীর উদাহরণ। শিঙা, তূরী, ভেরী (trumpet) প্রভৃতি পিতলে তৈরী বাতযন্ত্র আলাদা শ্রেণীর, কারণ এখানে বাদকের জিভ ও ঠোঁট শব্দ-উৎপাদনে মূল নেয়।

চিত্র 17.30—ফ্লু-অর্গ্যান-নল

ক. ফ্লু-অর্গ্যান-নল: এরা চৌকা প্রস্থচ্ছেদের কাঠের নল বা গোল প্রস্থচ্ছেদের ধাতুর নল (চিত্র 17.30) হতে পারে। তাদের এক মুখ, নিয়ন্ত্রণাধীন আঁটোসাঁটো (tight-fitting)

পিস্টন দিয়ে বন্ধ [চিত্র 17.30 (a)] থাকতে পারে কিম্বা খোলাও [চিত্র 17.30(b)] থাকতে পারে। সুর-বাঁধার প্রয়োজনে কার্যকরী দৈর্ঘ্য বদ্‌লাতে পিস্টনকে অল্পস্বল্প ওঠানো বা নামানো যেতে পারে। খোলা-মুখ নলে ছোট একটি কলার (sleeve) দিয়ে একই কাজ হয়। স্বনোৎপত্তি দিয়ে নলের দৈর্ঘ্য ঠিক করা হয়। নল চওড়া হলে এবং প্রস্থ তরঙ্গ-দৈর্ঘ্যের তুলনায় ছোট হলে, স্বনকম্পাংক প্রস্থ-নিরপেক্ষ হয়।

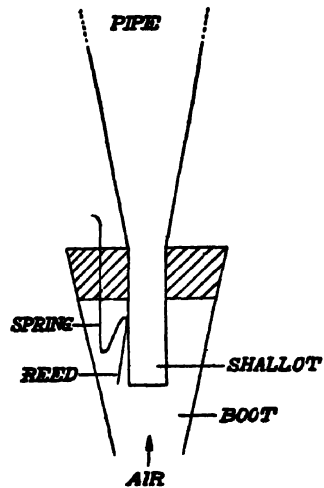
নলের অন্য প্রান্তের গড়ন বিশেষ রকমের হয়—তার কাজ নিয়মিত বায়ুস্রোতে বাধা দিয়ে ঘূর্ণী সৃষ্টি করা। তার নিচের সূচালো দিকে হাপর (bellows)-সহ একটি বায়ুপ্রকোষ্ঠ থাকে। A নালীর মধ্য দিয়ে সজোরে হাওয়া পাঠানো হয়। বায়ুস্রোত, সরু রন্ধ্র বা ফ্লু (F) পার হয়ে পার্শ্বরন্ধ্র (M) দিয়ে বেরিয়ে যায়; যাওয়ার সময়ে ফলক E-তে ব্যাহত হয়ে আবর্ত সৃষ্টি করে। আবর্তগুলি থেকে ফলক-সুর উৎপন্ন হয়। তাদের সংখ্যা সঠিক হলে, নলে অনুনাদ হয়। M-কে নলের খোলা প্রান্ত ব'লে ধরা যায়; সুতরাং নলে দৈর্ঘ্য অনুসারে সুর উৎপন্ন হয়। উৎপন্ন সমমেলগুলি ১৪-৩ অনুচ্ছেদে আলোচিত হয়েছে। নলের মুখে প্রান্তিক ত্রুটি অনেকটা—নলের ব্যাসার্ধের দু'-তিন গুণ। এই ত্রুটি আবার কিছুটা কম্পাংক-নির্ভর হওয়ায় উপসুরগুলি অসমমেল। বায়ুস্তম্ভ কাঁপতে থাকায় ফলক-সুরের সঙ্গে তার যোজন হয়ে উপসুরগুলি প্রবল হয়। তারা আবার নলের স্বভাবী কম্পাংকের যত কাছাকাছি হবে জোরটা ততই বেশী হবে।

বাঁশী: বাঁশের বা শরের বাঁশী সরল—প্রায় নিখরচার, সুপ্রাচীন, বহুপ্রচলিত বাদ্য। সাধারণভাবে বড় ফ্লুট বা ছোট পিকোলো, বাঁশীর মতোই দু'মুখ-খোলা বায়ুনল-বিশেষ। বাঁশীতে সাধারণত লম্বা নলের এক মুখ খোলা, অপর মুখ বন্ধ। বন্ধ মুখের কাছে বড় একটা ছিদ্র থাকে—সেইটাই অপর খোলা মুখের কাজ করে। আর খোলা মুখটি পর্যন্ত বাঁশীতে সাতটি ছিদ্র থাকে, বাদক আঙুল দিয়ে ইচ্ছেমতো তাদের বন্ধ করতে পারেন। অর্গ্যানে বায়ুস্রোতের মতো এখানে বড় ছিদ্রে ফুঁ দিয়ে বায়ুস্তম্ভে স্পন্দন সৃষ্টি করা হয়, আর ভিন্ন ভিন্ন ছিদ্র বন্ধ ক'রে স্পন্দক-স্তম্ভের দৈর্ঘ্য পাল্‌টানো হয়। সব ছিদ্র ক'টি বন্ধ রেখে আস্তে ফুঁ দিলে মূলসুর, আর বেশ জোরে ফুঁ দিলে প্রথম সমমেল বাজে; এক একটি ছিদ্র বন্ধ ক'রে স্বরগ্রামের সাতটি সুর বাজানো হয়। ফ্লুট দৈর্ঘ্যে অনেক লম্বা, তাতে ছিদ্র অনেক বেশী, এবং ছিদ্রের ব্যাস ছোট-বড় করা যায়। এর সুরবিস্তার তিন অষ্টক জুড়ে থাকে। অর্গ্যানে নানা

কম্পাংকের অনেকগুলি নল থাকে এবং হার্মোনিয়মের মতো কুঞ্চিকা-পেটিও (keyboard) থাকে।

খ. পত্রী-নল : স্কু- বা রন্ধ্র-নলে ফলক-সৃষ্ট পত্রাকার এক বায়ুস্রোত শব্দস্রষ্টা ; পত্রী-নলে একটি নমনীয় স্পন্দনক্ষম পাত সংশ্লিষ্ট বায়ুস্তম্ভে ক্রমান্বয়ে সংকোচন ও প্রসারণ সৃষ্টি ক'রে অনুনাদ জাগায়। পত্রী-নলের যেটুকু অংশ ছিদ্র ঢেকে রাখে, সেটুকু ছিদ্রের চেয়ে সামান্য ছোট বা সামান্য বড় হতে পারে। তাদের যথাক্রমে মুক্ত শ্রেণীর ও স্বরকম্প শ্রেণীর পত্রী বলে। দ্বিতীয় শ্রেণীর পত্রীগুলি বাইরের দিকে অল্প বাঁকানো থাকে ব'লে তারা অচল অবস্থায় ছিদ্রমুখ পুরো বুজিয়ে রাখে না।

রীড বা পত্রী-অর্গ্যান-নলের পরিপ্রেক্ষিতে পত্রীর ক্রিয়ারীতি বোঝা যায়। এইজাতীয় অর্গ্যান-নলটি সাধারণত শংকু-আকার ; তার সরু মুখটি শ্যালট নামের (চিত্র 17.31) এক বেঁটে নলের মাথায় চেপে বসে। শ্যালটের একপাশে একটি ছিদ্র দিয়ে হাওয়া-ঢোকার ব্যবস্থা থাকে। একটি বায়ুপ্রকোষ্ঠ (Boot) থেকে বায়ুস্রোত আসে। পত্রীটি (reed) একটি স্প্রিং-নিয়ন্ত্রিত এবং সাধারণত স্বরকম্পশ্রেণীর হয়।

'বুট' থেকে বায়ুস্রোত পত্রী ও শ্যালটের মাঝে সংকীর্ণ গর্তে ঢুকে পত্রীটিকে স্পন্দিত করে—তাতে ছিদ্রটি পর্যায়ক্রমে খোলে এবং বোজে। ফলে, হাওয়ার এক একটি ঝাপটা নলের মধ্যে ঢুকে সংকোচনের সৃষ্টি করে। সেই সংকোচন অর্গ্যান-নলের খোলা মুখ থেকে তনুভবনরূপে প্রতিফলিত হয়ে ফিরে আসে। তনুভবন নেমে এসে ছিদ্রমুখে নিম্নচাপ সৃষ্টি করায় পত্রীটি সরে এসে গর্তটি বুজিয়ে রাখে। সুতরাং তখন তনুভবন অপরিবর্তিত দশায় প্রতিফলিত হয়ে ফিরে যায় এবং খোলা মুখে প্রতিফলিত হয়ে সংকোচন-রূপে ফিরে আসে। এই সংকোচন ছিদ্রে ফিরে এসে উচ্চ চাপ প্রয়োগ ক'রে পত্রীকে ঠেলে সরিয়ে, ছিদ্র খুলে রাখে। বারে-বারে এই চক্র আবর্তিত হতে থাকে।

চিত্র 17.31—পত্রী-অর্গ্যান-নল

দেখা যাচ্ছে, পত্রীর একবার স্পন্দনকালে বায়ুর ঝাপটা চারবার নল ধ'রে আনাগোনা করে এবং তার ও নলের বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনের মধ্যে ঘনিষ্ঠ যান্ত্রিক যোজন রয়েছে। তাই উৎপন্ন শব্দকম্পাংক বায়ুস্তম্ভের স্বভাবী কম্পাংকের তুলনায় কম হয়। এই শব্দে যুগ্ম ও অযুগ্ম দু'রকম সমমেলই থাকে।

প্রসঙ্গত Oboe নামে এক দ্বিপত্রী-নলের উল্লেখ করা যায়। এর পত্রী-দুটির স্পন্দনের সঙ্গে মানুষের বাক্‌যন্ত্রে স্বরতন্ত্রীর স্পন্দনের ঘনিষ্ঠ সাদৃশ্য আছে এবং ওবো-র বাজনা অনেকটা মনুষ্যকণ্ঠের মতো। পত্রী দুটি বেতের; যখন তারা স্থির তখন তাদের মাঝের ফাঁক উপবৃত্তীয় এবং দুটি পত্রীর স্পন্দনাংকে সামান্য তফাৎ থাকে। বাজার সময়ে পত্রীগুলি অনুদৈর্ঘ্য ও অনুপ্রস্থ দু'ভাবেই কাঁপে এবং স্বরকম্প উৎপন্ন করে।

ক্ল্যারিওনেট, স্যাক্সোফোন, ব্যাসুন প্রভৃতি পত্রী যন্ত্রে বাঁশীর মতো ছিদ্রও থাকে, আবার চাবিও থাকে, উদ্দেশ্য সুরসংখ্যা বাড়ানো। প্রথম যন্ত্র দুটি একপত্রী, যথাক্রমে অসমমেল ও সমমেল সুরোৎসারী। তৃতীয়টি দ্বিপত্রী শংকু-নল-বিশেষ।

গ. হার্মোনিয়ম: আমাদের এই অতিপরিচিত যন্ত্রটি পিয়ানোর মতো কুঞ্চিকা-পেটি-যুক্ত এক বাতযন্ত্র। এতে ভিন্ন ভিন্ন সুরোৎসারী ধাতুর তৈরী লম্বা এবং চৌকা পত্রীশ্রেণী থাকে; তাদের স্পন্দনে বায়ু কম্পিত হয়। তাদের আর এক প্রান্ত একটা ব্লকে আটকানো; ব্লকে পত্রীর আকারের চেয়ে কিছুটা বড় এক ছিদ্র থাকে, তার মধ্যে পত্রীটি অবাধে কাঁপতে পারে।

যন্ত্রটিতে, সমীকৃত স্বরগ্রাম-অনুমোদিত অর্ধসুর তফাতে তফাতে, 13টি চাবি এক এক অষ্টকের জন্যে থাকে। স্বভাবী স্বরগ্রামের এক অষ্টকের সাতটি প্রধান সুর সাদা চাবিতে বাজে, আর মাঝের পাঁচটি খাদের সুরপঞ্চক কালো চাবিতে বাজানো যায়। সবশুদ্ধ সাড়ে তিন অষ্টক জুড়ে সুর বাজাতে 41টি চাবিযুক্ত পত্রী থাকে।

একে বাজাতে হাপর (বা bellows) চালিয়ে পত্রীর তলায় একটি ছিদ্রের মধ্য দিয়ে বায়ুস্রোত পাঠাতে হয়; চাবি টিপে ধরলে ছিদ্রের মুখ খুলে যায় এবং বায়ুস্রোত এসে পত্রীকে কাঁপায়। উৎপন্ন সুরে অসমমেল থাকায়, এই যন্ত্রে স্বরজাতি কিছুটা তীক্ষ্ণ, অর্গ্যান বা পিয়ানোর মতো মধুর নয়। তাই অর্কেস্ট্রায় এর ব্যবহার নেই।

ঘ. শিঙাকৃতি বাতযন্ত্র: ১৪-১০ এবং ১৪-১১ অনুচ্ছেদে বিভিন্ন

আকারের প্রস্থচ্ছেদের বায়ুস্তম্ভের স্পন্দনবৈশিষ্ট্য আলোচিত হয়েছে। স্বভাবতই তারাও সুরোৎসারী যন্ত্র হতে পারে। যন্ত্রগুলি সাধারণত পিতলের তৈরি এবং তুরী (bugle), ভেরী (trumpet), শিঙা (cornet) প্রভৃতি বহু শ্রেণীর হয়। এদের প্রধান অংশ—দীর্ঘ এক বায়ুনল ; তার প্রস্থচ্ছেদ উপ (quasi)-শংকু বা পরাবৃত্তীয়—তার প্রশস্ত খোলা প্রান্ত ঘণ্টার আকার আর বাদ্যপ্রান্ত বা মুখ-নলটি পেয়ালার আকারের হয়। বাদকের ঠোঁট একটি দ্বি-ঝিল্লীপত্রীর মতো পর্যায়ক্রমে খোলে আর বোজে এবং বায়ুস্তম্ভের সঙ্গে স্পন্দনে সক্রিয় অংশ নেয়। ঠোঁটের স্থাপন, টান এবং ফুঁয়ের চাপের ওপর উদ্ভূত সুরশ্রেণী নির্ভর করে। কিন্তু সুর-কম্পাংক নলের আকার, প্রস্থচ্ছেদের রূপ এবং বায়ুর উষ্ণতার ওপর নির্ভর করে। কাজেই নলের ব্যাস, দৈর্ঘ্য, মুখ-নলের আকার, ঘণ্টা-মুখের মাপ, শিঙার বিস্তৃতি-হার প্রভৃতির ওপর উৎপন্ন স্বনজাতি নির্ভর করে। সুরবন্ধনের জন্য ছিদ্র, কলার, ভাল্‌ভ প্রভৃতির ব্যবস্থা থাকে—যাতে মূলসুরের সঠিক সমমেলশ্রেণী উৎপন্ন করা হয়।

১৭-১৭. অপস্বর (Noise) :

আগেই বলা হয়েছে যে, অপস্বর বর্তমান নাগরিক সভ্যতার অন্যতম অভিশাপ। কিন্তু এর সংজ্ঞা-নির্ধারণ খুবই কঠিন। 'ব্রিটিশ স্ট্যাণ্ডার্ড্‌স অ্যাসোসিয়েশন' বলছেন—শব্দ অপস্বর হবে তখনই, যখন শ্রোতা সেটি অপছন্দ করবেন ; অর্থাৎ অপস্বর বিরক্তি ঘটায়। কিন্তু এই সংজ্ঞা স্পষ্টতই ব্যক্তি-সাপেক্ষ ; পূজার উদ্যোক্তাদের কাছে, লাউড-স্পীকারের উচ্চগ্রামে বাজনা, সঙ্গীত পাড়াপড়শীর কাছে বিভীষিকা ; কালীপূজায় পট্‌কা, দো-দমা প্রভৃতির কান-ফাটানো আওয়াজ বৃদ্ধ, হৃদ্‌রোগী ও শিশুর কাছে প্রাণান্তকর, যারা ফাটায় তাদের কাছে স্বর্গীয়। সুতরাং মনস্তাত্ত্বিক, কিছুটা দেহতাত্ত্বিক, এই সংজ্ঞা মোটেই গ্রহণযোগ্য নয়। বিজ্ঞানে যথেষ্ট অগ্রসর দেশগুলিতে অপশব্দের বিজ্ঞান সম্পর্কে আইন, প্রযুক্তিবিদ্যা, দৈহিক ও মানসিক স্বাস্থ্য, পরিবেশ প্রভৃতির দৃষ্টিকোণ থেকে বহু আলোচনা ও গবেষণা হয়েছে এবং চলছে।

সাধারণত দেখা গেছে যে, বহু স্বনকের সম্মিলিত প্রবল এবং সম্পূর্ণ আলাদা আলাদা কম্পাংকের মিলিত শব্দের ফলশ্রুতি অপস্বর। ১৭-১১খ-তে সুরবিক্ষোভের আলোচনাতেও এই সিদ্ধান্ত স্বীকৃত। সুতরাং অপস্বরকে নির্দিষ্ট তীক্ষ্ণতা-বর্জিত শব্দও বলা চলে। আবার প্রাবল্য, তীক্ষ্ণতা, অসঙ্গীত প্রভৃতির যেকোন একটি বা একাধিক কারণে এক-কম্পাংকের সুরও অপস্বরের অনুভূতি জাগাতে পারে।

অপস্বর নানা ভাবে আপত্তিকর হতে পারে—বিরক্তি ঘটাতে পারে বা কাঙ্ক্ষিত শব্দকে চাপা দিতে পারে। প্রচণ্ড অপস্বর, যথা বিস্ফোরণ, কানের পর্দার ক্ষতি ঘটাতে পারে, নানারকম স্নায়বিক বৈলক্ষণ্য আনতে পারে। কল-কারখানায় অনবরত প্রবল অপস্বরের মধ্যে থাকলে কর্মক্ষমতা এবং স্বাস্থ্যের হানি ঘটে। 30 থেকে 70 ডেসিবেল প্রাবল্য—গৃহে ঘুমের ব্যাঘাত এবং শান্তির পরিপন্থী হয়; 70 থেকে 100 ডেসিবেল প্রাবল্য কর্মক্ষমতা কমায়; তার বেশী প্রাবল্যে কানের বা স্বাস্থ্যের ক্ষতি হয়।

প্রশ্নমালা

১। মানুষের বাক্‌যন্ত্র বর্ণনা কর। উচ্চারিত এবং অনুচ্চারিত শব্দের উৎপত্তি কি-ভাবে সম্ভব?

২। স্বরবর্ণালী কাকে বলে? কয়েকটি উদাহরণ দাও। স্বরবর্ণের উৎপত্তি বিশদভাবে ব্যাখ্যা কর।

৩। শব্দগ্রাহী হিসাবে কানের অনন্যতার কিছু পরিচয় দাও। কানের ভিন্ন ভিন্ন অংশ এবং তাদের ক্রিয়া ব্যাখ্যা কর। কানে কি-ভাবে শাব্দশক্তি স্পন্দনশক্তির মাধ্যমে স্নায়বিক শক্তিতে রূপান্তরিত হয়? কানের কোন্ কোন্ অংশে এই পরিবর্তনগুলি ঘটে?

৪। শব্দের বিশ্লেষণ কানে কি-ভাবে হয়? শম্বুকী-বিভব বলতে কি বুঝি? কানের ক্রিয়াপদ্ধতি বুঝতে এর গুরুত্ব কি?

৫। হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ-উদ্ভাবিত শ্রবণপ্রক্রিয়ার অনুনাদী-তত্ত্ব ব্যাখ্যা কর। এর অসঙ্গতি ও দুর্বলতা কোথায়? এ-সম্বন্ধে আধুনিক ধারণাই বা কি?

৬। শ্রবণসীমান্ত বলতে কি বোঝ? শ্রুত শব্দের তীব্রতা ও কম্পাংক সীমিত-মান—বক্তব্যটির পূর্ণ ব্যাখ্যা দাও।

৭। শাব্দ তীব্রতা ও প্রাবল্যের মধ্যে তফাৎ কোথায়? ওয়েবার-ফেক্‌নার সূত্র ব্যাখ্যা কর। (ক) বেল ও ডেসিবেল, (খ) ফন ও সোন—এরা কি? তীব্রতা-স্তর কাকে বলে? শাব্দচাপ-স্তরের সঙ্গে তার সম্পর্ক কোথায়? তীব্রতা-ভেদের অনুভূতি কি-ভাবে কম্পাংক-নির্ভর?

৮। তীব্রতা-বিচারে কম্পাংকের ভূমিকার বিস্তারিত আলোচনা কর। মেল কাকে বলে? শব্দের অন্যান্য বৈশিষ্ট্য কি তীব্রতাবোধকে প্রভাবিত করে? তীক্ষ্ণতা- ও তীব্রতা-সচেতনতা কি-ভাবে কম্পাংকের সঙ্গে বদ্‌লায়?

৯। ডপ্‌লার-তত্ত্ব কি ? স্বনক, শ্রোতা ও মাধ্যম সকলেই সচল হলে, কম্পাংক কি-ভাবে বদ্‌লাবে ? (আপেক্ষিক গতি পরস্পরের দিকে এবং বিপরীত দিকে ধর ।)

স্বনক এবং শ্রোতা স্থির, কিন্তু সচল আয়না থেকে তরঙ্গ প্রতিফলিত হলে কম্পাংকের কি পরিবর্তন হবে ? শ্রোতা সচল স্বনকের গতিপথে না থাকলেই বা কি-রকম পরিবর্তন হবে ?

জ্যোতির্বিজ্ঞানে ডপ্‌লার-তত্ত্বের সম্ভবপর অবদান কি কি ?

১০। সুরেলা শব্দের স্বনজাতি বলতে কি বোঝায় ? স্বনজাতি কি সুরবৈশিষ্ট্য না স্বরবৈশিষ্ট্য ? স্বনজাতি কিসের ওপর নির্ভর করে ?

১১। স্বরগ্রাম ও সুর-অন্তর কাকে বলে ? সুরসঙ্গতি ও সুরবিক্ষোভ কি কি ? এদের উৎপত্তি কেন হয় ? মেল ও তান কি ? স্বভাবী এবং সমীকৃত স্বরগ্রামে সুরবিন্যাস কি-ভাবে করা হয়েছে ?

১২। বাদ্যযন্ত্রের প্রধান প্রধান শ্রেণীভেদ কি ? তাদের বৈশিষ্ট্যগুলি সংক্ষেপে আলোচনা কর। ঘাতযন্ত্রশ্রেণী কি সুরেলা স্বনক ? এদের ক্ষেত্রে অনুনাদের ভূমিকা কি ? অনুনাদকের কাজ কে করে ?

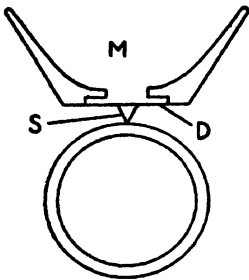
১৮

শব্দের মুদ্রণ ও পুনর্নাদ

(Recording and Reproduction of Sound)

১৮-১. ফনোগ্রাফ :

মিলার-এর উদ্ভাবিত ফনোডাইক যন্ত্রে শব্দের তরঙ্গরূপ কি-ভাবে মুদ্রিত হয় (§ ১৬-৪খ) তা আমরা দেখেছি। মুদ্রিত তরঙ্গরূপ থেকে মূল শব্দতরঙ্গের পুনরুৎপাদনকে বা পুনর্জননকেই আমরা **পুনর্নাদ** ব'লবো।

শব্দতরঙ্গের প্রথম সফল মুদ্রণ ও পুনরুৎপাদন সম্ভব হয়েছিল এডিসন-এর স্বনলিখ্ বা ফনোগ্রাফ যন্ত্রে (চিত্র 18.1)। যে শব্দতরঙ্গ মুদ্রিত করা হবে সেটিকে M শিঙা দিয়ে সংগ্রহ করা হয়। সংহৃত শব্দতরঙ্গ শিঙার সরু মুখে পাতলা পর্দা D-র ওপর প'ড়ে তাকে কাঁপায়; সেই কম্পন আপতিত শব্দতরঙ্গের চাপভেদ-অনুসারী হয়। D পর্দার কেন্দ্রে লম্বভাবে থাকে তীক্ষ্ণাগ্র পিন S; পর্দার কম্পন অনুসারে তার অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দন হতে থাকে। পিনের সূচীমুখ একটি বেলনের গায়ে একটু চেপে বসে। বেলনটির গায়ে এক বিশেষ-জাতীয় মোমের মসৃণ ও পুরু আবরণ দেওয়া থাকে। ছোট একটি

চিত্র 18.1—ফনোগ্রাফ

মোটরের সাহায্যে বেলনটিকে তার লম্ব-অক্ষ-সাপেক্ষে সুষম বেগে ঘোরানো হয়; ঘোরা-কালে একটি স্ক্রু-র ক্রিয়ায় বেলনটি তার অক্ষ বরাবর এবং পিন S-এর লম্ব দিকে এগিয়ে চলে। সুতরাং শব্দ-সংগ্রাহক পর্দা স্থির থাকলে পিনটি বেলনের গায়ে প্যাঁচানো স্প্রিং-এর মতো সমগভীর সর্পিল নালী কাটে। পর্দা কাঁপতে থাকলে পিন ওঠা-নামা করতে থাকে; কাজেই কাটা নালীর গভীরতা তদনুসারে কমবেশী হবে। শাব্দচাপ অনুযায়ী গভীরতা কমবেশী হয়; সুতরাং এই উঁচু-নিচু নালীই শব্দের তরঙ্গরূপের প্রতীক হয়ে দাঁড়ায়। একেই রেকর্ড বা অনুলিপি বলে। মুদ্রণকালে মোমের আবরণ নরম থাকে, পরে শক্ত হয়ে যায়। এই মুদ্রণ-পন্থাই 'আল-খাল' পদ্ধতি।

পুনর্নাদ ঘটাতে S-পিনটিকে এই প্যাঁচানো নালীর গোড়ায় বসিয়ে বেলনটিকে ঠিক আগের মতো রীতিতে ও বেগে চালানো হয়। তাতে পিনের সূচীমুখ নালীর কমবেশী গভীরতা অনুসারে ওঠে নামে এবং D পর্দাকে কাঁপায়। এই কম্পন শব্দমুদ্রণকালে পর্দার স্পন্দনেরই প্রতিকৃতি। ফলে, বায়ুতে মূল শব্দের পুনরাবির্ভাব ঘটে।

ফনোগ্রাফ (১৮৭৮) যন্ত্রটির দুটি প্রধান ত্রুটি ছিল—

(১) মোমের নমনীয়তার কারণে শাব্দ-অনুলিপিতে উঁচু নিচু বা 'আল-খাল'গুলি সমান হয়ে গিয়ে সেটি তাড়াতাড়ি নষ্ট হয়ে যেত, এবং

(২) পর্দা D এবং শিঙা M-এর স্বভাবী কম্পন, সংগৃহীত শব্দের নানা অঙ্গসুরের সঙ্গে অনুনাদ ঘটিয়ে অনুলিপিতে বিকৃতি আনতো।

১৮-২. শব্দমুদ্রণ এবং পুনর্নাদের মূল তত্ত্ব ও প্রাথমিক আলোচনা :

ফনোগ্রাফের ক্রিয়াপদ্ধতি থেকেই আমরা মুদ্রণ এবং পুনর্নাদের মূলতত্ত্ব পাই—স-টান স্পন্দনক্ষম পাতলা পর্দার ওপর শব্দতরঙ্গ পড়লে শাব্দচাপভেদের অনুসারে সে কাঁপবে। পরে তাকে যদি ঠিক সেইভাবেই কাঁপানো যায়, তাহলে বায়ুতে মূল শব্দতরঙ্গ পুনরুৎপাদিত হবে।

শব্দের মুদ্রণ বলতে আমরা তার তরঙ্গরূপকে ধরে রাখার যেকোন পদ্ধতি বুঝবো। সময়সাপেক্ষে শব্দতরঙ্গে চাপভেদও তরঙ্গরূপের এক ধরনের প্রতীক। শব্দের ক্রিয়ায় পর্দার স্পন্দন চাপভেদের কারণেই ঘটে এবং তরঙ্গরূপ এই আকারেই সঞ্চিত বা মুদ্রিত করা হয়। ফনোগ্রাফে মুদ্রণরীতিকে যান্ত্রিক উপায়ে শব্দরূপ সংরক্ষণ বলা চলে। সেকালের গ্রামোফোন-রেকর্ডে লিপিপ্রকরণও যান্ত্রিক ছিল ; বর্তমানে অবশ্য এই লিপি বৈদ্যুতিক রীতিতে করা হয়। আধুনিক কালে শব্দমুদ্রণের আরও দুটি পন্থা বেরিয়েছে—(ক) আলোর সাহায্যে, যেমন সিনেমার ফিল্মে, আর (খ) চুম্বকনের সাহায্যে, যেমন টেপ-রেকর্ডারে।

বেলন বা স্তম্ভকের ওপর শব্দমুদ্রণের তথা সংরক্ষণের উদাহরণ আমরা দেখলাম ; তাতে ত্রুটি নানা-রকমের। বর্তমানে ডিস্ক বা চাকতির ওপর মুদ্রণ করা হয়। শক্ত মোমের বিশেষভাবে প্রস্তুত চাকতিতে শব্দমুদ্রণ ক'রে ভিনাইল প্ল্যাস্টিকের ওপর সেই অনুলিপি ফেলে গ্রামোফোনে বাজাবার রেকর্ড তৈরি হয়। এখানে যে সর্পিল নালী কাটা হয় তার গভীরতা সমান, কিন্তু প্রস্থ অসমান ; নালীর প্রস্থভেদ মূল শব্দপ্রাবল্যের সমানুপাতিক। বর্তমানে

মুদ্রণের রীতি বৈদ্যুতিক ; শব্দতরঙ্গ, গ্রাহক-মাইক্রোফোনের পর্দায় স্পন্দন ঘটিয়ে যে পরিবর্তী প্রবাহ সৃষ্টি করে তার সাহায্যেই লিপিকারক বা সূচী-লেখনী চালু হয় এবং সূচীর পার্শ্বসরণ প্রবাহমাত্রার সমানুপাতিক।

আলোক-সচেতন ফিল্‌মে শব্দমুদ্রণও বৈদ্যুতিক। সেখানে মাইক্রোফোনের ধারার সাহায্যে ফিল্‌ম্‌-উদ্ভাসী আলোক-উৎসের আলোক[illegible]রণে প্রাবল্যের ভেদ ঘটিয়ে কিম্বা ফিল্‌মের আলোকিত অংশের প্রস্থে পরিবর্তন ঘটিয়ে শব্দমুদ্রণ করা হয়—যথাক্রমে পরিবর্তী-ঘনত্ব ও পরিবর্তী-ক্ষেত্র মুদ্রণ-পন্থা।

চৌম্বক পন্থায় শব্দমুদ্রণ করতে একটি সরু দীর্ঘ প্রচুম্বকীয় ফিতাকে (tape) শাব্দচাপ অনুযায়ী অনুদৈর্ঘ্যভাবে চুম্বকিত করা হয়। শব্দের তরঙ্গরূপ ফিতায় অনুদৈর্ঘ্য-চুম্বকনভেদ রূপে ধরা থাকে।

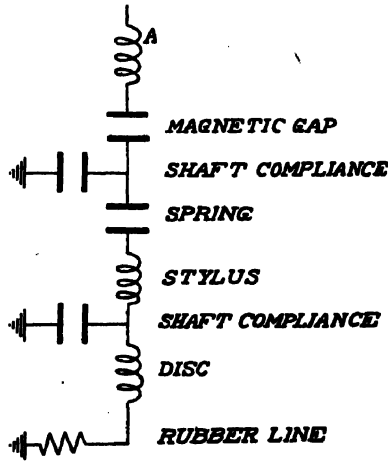
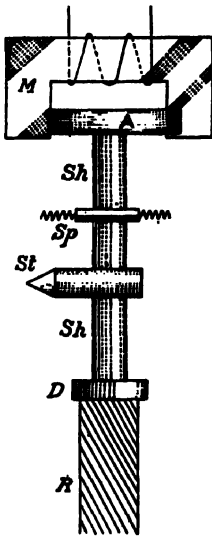
শব্দের মুদ্রণকালে স্বভাবতই তরঙ্গরূপের প্রকৃতি, সরণবিস্তার বা শক্তির রূপান্তর ঘটাতে হয় ; তাতে বিকৃতি অবশ্যম্ভাবী। তরঙ্গরূপে জটিলতা যত বেশী, বিকৃতির সম্ভাবনাও তত বেশী। বিকৃতিদোষ প্রধানত ঘটায় অনুনাদ—ফনোগ্রাফে এ-দোষ অন্যতম। সুতরাং পুনর্নাদে ঠিক মূল শব্দ মেলে না। পুনর্নাদ বিশ্বস্ত বা অবিকৃত হতে হলে শব্দের তীব্রতা বা কম্পাংক-মুদ্রণে ত্রুটি থাকা চলবে না ; কম্পনে অসমঞ্জস (asymmetrical) স্পন্দন বা নতুন কোন কম্পাংক যেন ঢুকে না পড়ে। পুনর্নাদে বিশ্বস্ততার প্রধান বিচারক আমাদের কান ; সৌভাগ্যক্রমে প্রাবল্যে 10% মতো ত্রুটিও কানের সাড়ায় বিশেষ হেরফের ঘটায় না। তীক্ষ্ণতা-বিচারে কান ঢের বেশী সজাগ, তবে 50 থেকে 5000 হাৎ'জের মধ্যে কম্পাংক-পুনরুৎপাদনে সাফল্য সহজলভ্য। তীব্রতা-পুনরুৎপাদনে ব্যবহারিক অসুবিধা তুলনায় অনেক বেশী, কিন্তু তার প্রয়োজনও কম।

বর্তমানে ইলেকট্রনীয় বর্তনী-প্রকরণ এবং জটিল শাব্দবর্ণালীর মাপজোখে অভাবনীয় অগ্রগতির ফলে পুনরুৎপাদিত শব্দ এখন প্রায় মূল শব্দানুগ করা সম্ভবপর হয়েছে। ১৯২৪ সনে ম্যাক্সফিল্ড ও হ্যারিসন প্রথম, যান্ত্রিক স্পন্দনের ও বৈদ্যুতিক দোলনের সাদৃশ্যের উপলব্ধি করেন ; প্রথমটিতে দ্বিতীয় শ্রেণীর সুপরিচিত নীতিগুলির সার্থক ও ব্যাপক প্রয়োগেই এই অগ্রগতির সুরু হয়।

১৮-৩. ডিস্‌কে বা চাকতিতে শব্দের মুদ্রণ-ব্যবস্থা :

বর্তমানে চাকতিতে শব্দমুদ্রণ বৈদ্যুতিক উপায়ে করা হয়। এই ব্যবস্থায় তিনটি প্রধান অংশ—(১) মুদ্রক-শীর্ষ (recording or cutting head)

(২) সুষম বেগে ঘূর্ণমান মঞ্চ (turn-table) এবং (৩) তার ওপরে নরম মোমের ডিস্‌ক্ তথা চাক্‌তি।

ক. **শব্দমুদ্রক :** যে শব্দতরঙ্গ মুদ্রিত করতে হবে তাকে ভালো মাইক্রোফোনের পর্দায় ফেলে স্পন্দন জাগানো হয় ; সেই স্পন্দন মাইক্রোফোনে যে প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা উৎপন্ন করে, তাকে ভাল্‌ভ্-সম্প্রসারকের সাহায্যে বহুগুণ বিবর্ধিত ক'রে শব্দমুদ্রকের বিদ্যুৎ-চুম্বকে [18.2(*a*) চিত্রে M] যোগানো হয়। বিদ্যুৎ-চুম্বকের প্রত্যাবর্তী আকর্ষণে একটি লোহার পাত (A) ঘুরতে পারে ; তাকে আর্মেচার বলে। আর্মেচার-দণ্ডে (Sh) স্প্রিং (Sp) এবং দাগ-কাটার জন্য বিশেষ আকারের নরুন (St) থাকে। দণ্ডের প্রান্তে একটি ভারী চাক্‌তি (D) এবং অবাঞ্ছিত উচ্চ কম্পাংক দমনের জন্য শক্ত

চিত্র 18.2 (*a*)—শব্দমুদ্রক চিত্র 18.2 (*b*)—তার প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী

একটি রবার দণ্ড (R) থাকে। মুদ্রকের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনীর আঙ্গিকগুলি 18.2 (*b*) চিত্রে দেখানো হয়েছে। নরুনটির কাজ মূল রেকর্ডের ওপর দাগ-কাটা ; তার কাটুনী-প্রান্তটি নীলার তৈরি এবং বাটালির মুখের আকারের হয়।

খ. শব্দের মুদ্রণ : বিশেষভাবে তৈরী নরম মোমের চাকৃতিতে আদি মুদ্রণ অর্থাৎ শব্দের তরঙ্গরূপ প্রথম লিপিবদ্ধ করা হয়। চাকৃতিটি এক ভারী ঘূর্ণনমঞ্চে (turn-table) রেখে, তাকে সমবেগে ঘোরানো হয়; ভার-চালিত এক ঘড়িযন্ত্রই এই ঘোরার শক্তি যোগায়। কাটুনী-নরুনটি চাকৃতির ওপর সামান্য চেপে রেখে তাকে গিয়ার-সজ্জার ক্রিয়ায় ধীরে ধীরে ব্যাসার্ধ বরাবর কেন্দ্রের দিকে ঠেলে দেওয়া হয়। তখন চাকৃতিটি ঘুরতে থাকলে তার ওপর একটি সাঁপিল সঞ্চারপথ আঁকা হতে থাকে; সেই খাঁজ বা নালীর প্রস্থ বা গভীরতা সর্বত্র সমান। আধুনিক সিনেমা-প্রোজেক্টারের বেলায় নরুনের গতি অরীয় কিন্তু কেন্দ্রাতিগ (বাইরের দিকে)।

মাইক্রোফোন শাব্দচাপভেদকে প্রত্যাবর্তী বিভবভেদে রূপান্তরিত করে। সেই বিভবভেদকে বিবর্ধিত এবং বিকৃতি-শুদ্ধ ক'রে মুদ্রক-চুম্বকে পৌঁছে দেওয়া হয়। তখন প্রতি নিমেষে মাইক্রোফোন-প্রবাহের সমানুপাতে, কাটুনী-বিন্দুর, সঞ্চারপথের লম্ব-দিকে স্বল্প পরিমাণ অনুপ্রস্থ সরণ হতে থাকে; ফলে, সুষম প্যাঁচের বদলে একটি তরঙ্গায়িত সাঁপিল নালী কাটা হতে থাকে; তার গভীরতা সর্বত্র সমান, কিন্তু প্রস্থ মাইক্রোফোন-প্রবাহের নিমেষমানের তথা শাব্দ-চাপভেদের সমানুপাতিক হয়। এই অসমপ্রস্থ সাঁপিল নালীটি মুদ্রিত শব্দের তরঙ্গরূপের দ্যোতক বা প্রতিভূ।

সামান্য চিন্তা করলেই বোঝা যাবে যে, এই সঞ্চারপথ যে বায়ুতে শব্দতরঙ্গের অবিকল প্রতিলিপি হবেই এমন কোন কথা নেই, পুনর্নাদের শব্দ মূল শব্দের অনুগামী হলেই হ'ল। মুদ্রণে যে সব বিকৃতি আসে তাদের, পুনর্নাদের ব্যবস্থায় [যেমন শব্দপেটির (sound-box) পর্দা বা স্পীকারের শিঙাতে] প্রতিবিধান করা যায়; অর্থাৎ মুদ্রণ এবং পুনর্নাদ দুই ব্যবস্থাতে যন্ত্রের সাড়া শাব্দতীব্রতার ($I=2\pi^2n^2a^2\rho c$) সমানুপাতী করা হয়। তা হতে হলে, শক্তি-ঘনত্ব ($\propto n^2a^2$) অপরিবর্তিত থাকবে; তখন সব কম্পাংকেই সরণ-বিস্তার (a) কম্পাংকের (n) ব্যস্তানুপাতিক, অর্থাৎ বেগবিস্তার ($2\pi na$) অচঞ্চল থাকবে। এই সর্তাধীনেই **স্থিরবেগ-মুদ্রণ** হয়; পুনর্নাদের পক্ষে এই পন্থা বিশেষ উপযোগী, কেননা সাউণ্ড-বক্সে উৎপন্ন শাব্দচাপ মুদ্রণবিন্দুর বেগের সমানুপাতিক; সেই বেগ আবার মাইক্রোফোনে আপতিত শাব্দচাপজনিত বিভবভেদের সমানুপাতিক।

গ. রেকর্ড বা শব্দ-অনুলিপি : মূল রেকর্ড সাধারণত 13" ব্যাসের

এবং 1⅛" মোটা মোমের একটি সাবানের মতো, তার ওপরের তলটি মিহি ব্রোঞ্জের গুঁড়ো ছড়িয়ে খুব ভালোভাবে পালিশ করা থাকে। ধাতুর প্রলেপ একে বিদ্যুদ্‌বাহী করে। এর ওপরেই শব্দের তরঙ্গরূপ লিখিত হয়।

পুনর্নাদের জন্য ব্যবহার্য রেকর্ড তৈরি করতে এবার তড়িৎলেপন-পদ্ধতিতে এর ওপর খুব পাতলা অথচ শক্ত তামার আস্তরণ ফেলা হয়; তামার ফলকে মোমের লিপির বিপরীত ছাপ পড়ে—নালীর জায়গায় আল (ridges) হয়ে যায়। এই ছাঁচকে বলে মাস্টার-রেকর্ড, আলোকচিত্রের নেগেটিভের মতোই তার ভূমিকা। তার ওপরে আবার তামার ছাপ ফেলে কার্যক্ষম পজিটিভ তৈরি হয়—তাকে জনক (mother)-লিপি বলে। জনক থেকে আবার ছাপ তুলে নিয়ে এক নেগেটিভ ছাঁচ বা working matrix তৈরি করা হয়। এর থেকে নেওয়া পজিটিভ ছাপগুলিই ব্যবহার্য অনুলিপি। সমগ্র পদ্ধতিকে **পরিস্ফুটন প্রক্রিয়া** (processing) বলে। কার্যকর ধাত্র বা matrix জীর্ণ বা অব্যবহার্য হয়ে গেলে জনক-লিপি থেকে নতুন ক'রে তৈরি করা হয়। জনক-লিপি নষ্ট হলে, মাস্টার-রেকর্ড থেকে কাজ করা হয়।

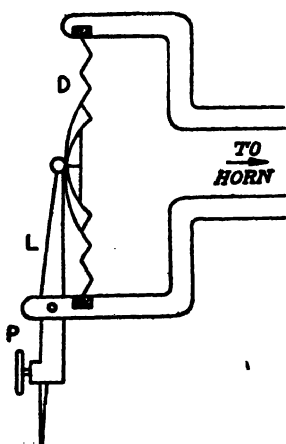
লাক্ষা, গালা, রজন, বার্নিশ, শ্লেট-পাথরের গুঁড়ো, কার্বন ব্ল্যাক, রবার প্রভৃতির ঘন মিশেল দিয়ে আগে ব্যবহার্য রেকর্ড তৈরি হ'ত। মিশ্রণকে গরম ক'রে নিয়ে নরম অবস্থায় কার্যকর ধাত্রের ওপর সুষম চাপে রেখে রেকর্ড তৈরি হ'ত; বর্তমানে ব্যবহৃত উপাদান ভিনাইল প্ল্যাস্টিক। হাইড্রলিক প্রেসের ওপর ও নিচের দুই পাতে দু'খানা গানের matrix রেখে মাঝে চাক্‌তিটি বসিয়ে দু'পিঠে দুটি ছাপ ফেলা হয়। ঠাণ্ডা হলে চাক্‌তিটি কঠিন, মসৃণ, নমনীয় **আধুনিক অনুলিপি** (record) হয়ে দাঁড়ায়।

লং-প্লেয়িং অর্থাৎ রেকর্ড দীর্ঘকাল ধ'রে বাজাবার হলে, নালী খুব সরু এবং পাকগুলি খুব কাছাকাছি হওয়া চাই; নালীবেধ সাধারণত 0.006" হয় এবং দুই পাকের মধ্যে 0.01" মতো জায়গা থাকে। স্থিরবেগ-মুদ্রণে স্বল্প কম্পাংককে সরণ-বিস্তার বেশী হতে হবে, অর্থাৎ নালী চওড়া হবে। সবচেয়ে সরু সূচীমুখের ব্যাস 0.003" হয়; 5000 হার্ৎজের কম্পাংক মুদ্রণ করতে বেগ 72 *rpm* আসার কথা, তাই সামঞ্জস্য রাখতে আগের দিনে বেগ, মিনিটে 78 পাক রাখা হ'ত। তাতে ইঞ্চিতে 100টির মতো পাক থাকতো,

12″ রেকর্ড 5.13 মিনিট ধ'রে বাজতো। সম্প্রতি অনুনালী (micro-groove) রেকর্ড বেরিয়েছে। ভিনাইল প্ল্যাস্টিকের এই অনুলিপিগুলি 10 থেকে 20 মিনিট ধ'রে বাজে, তাতে নালী সংখ্যা তিনগুণ, বেগ 45 *rpm* (*E.P*) এবং 33⅓ *rpm* (*L.P*) এবং শব্দ খুবই পরিষ্কার ও অবিকৃত। নালীসংখ্যা বাড়াতে গত শতাব্দীর 'আল-খাল' (hill and dale) মুদ্রণপ্রণালী পুনরুজ্জীবিত করা হয়েছে।

১৮-৪. পুনর্নাদ: ক. যান্ত্রিক ব্যবস্থা—গ্রামোফোন:

রেকর্ড বাজাবার যান্ত্রিক ব্যবস্থার নাম গ্রামোফোন (১৮৮৭)—উদ্ভাবক আমেরিকাবাসী জার্মান—এমিল বার্লিনার। যন্ত্রটি এডিসন-এর ফনোগ্রাফের উন্নততর সার্থক সংস্করণ। তার প্রধান অংশগুলি ছিল শব্দপেটি, স্বনবাহু, ঘূর্ণমঞ্চ, এবং শিঙা।

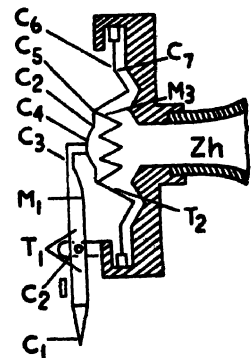
মঞ্চের ওপর রেকর্ড বসিয়ে তাকে, মুদ্রণ যে বেগে হয়েছিল সেই বেগে ঘুরতে দেওয়া হয়। হাতে দম-দেওয়া স্প্রিং রেকর্ড-সহ মঞ্চ ঘোরানোর শক্তি যোগায়; একটি যান্ত্রিক নিয়ন্ত্রক (governor) মঞ্চের বেগ সুষম রাখে। ঘূর্ণমান রেকর্ডের বহিঃপ্রান্তের কোন বিন্দুতে সাউণ্ড-বক্সের পিন বসালেই সে বাজতে সুরু করে; সুচীটি লিপিনালী ধ'রে ধীরে ধীরে রেকর্ডের কেন্দ্রের দিকে স'রে যেতে থাকে এবং সঙ্গে সঙ্গে নালীর প্রস্থ বরাবর ন'ড়ে ন'ড়ে সাউণ্ড-বক্সকে সক্রিয় রেখে যথাযোগ্য শব্দপ্রাবল্য উৎপন্ন করতে থাকে।

চিত্র 18.3—শব্দপেটি বা সাউণ্ড-বক্স

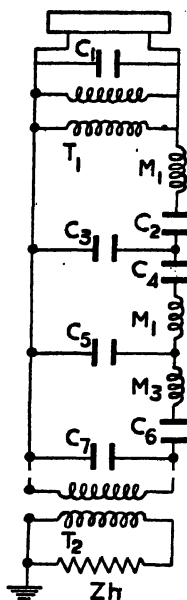
গ্রামোফোনের সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ অংশ **শব্দপেটি** বা **সাউণ্ড-বক্স** (চিত্র 18.3)—পিন এবং স্পন্দনক্ষম পর্দার সমন্বয়। এর প্রধান প্রধান অংশ (১) বিশেষ ঢেউ-খেলানো ধাতুর তৈরী পাতলা একটি গোল পর্দা (D), তার পরিধি দুটি রবারের চাকৃতির মধ্যে শক্ত ক'রে আটকানো; (২) ধাতুনির্মিত লেভার (L)—তার আলম্ববিন্দুতে (P) পিন (N) আঁটা হয়; পিনটি লেভারের খাড়া বেঁটে বাহু আর তার লম্বা অনভূমিক বাহুটি পর্দার মধ্যবিন্দুতে আটকানো। পেটিটি একটি ছোট বাক্সের মতো; তার এক মুখে D পর্দা, অন্য মুখে একটি বাঁকা

ধাতু-নল বা স্বনবাহু লাগানো থাকে। রেকর্ডের নালীর মধ্যে সূচীর পার্শ্বসরণ লেভারের ক্রিয়ায় পরিবর্ধিত হয়ে D পর্দার যথাযথ স্পন্দন ঘটায়; তাতেই পুনর্নাদ অর্থাৎ শব্দের পুনরুৎপাদন হয়। পর্দাটিকে ঢেউ-খেলানো করার উদ্দেশ্য, খাদের সুরগুলির সুষ্ঠু প্রকাশ।

স্বনবাহু (tone arm) একটি বাঁকা ধাতুর নল; সে শব্দপেটিকে শব্দবিবর্ধক শিঙার সঙ্গে যুক্ত করে। এই নলটিকে ইতস্তত নাড়িয়ে সাউণ্ড-বক্সকে রেকর্ডের যেকোন জায়গায় বসানো বা তুলে অন্যত্র বসানো যায়। এর উপস্থিতিতে রেকর্ডের ওপর পিনের চাপ অনেকটা কম পড়ে।

এই নলের অপর প্রান্তে **শিঙা** (horn) থাকে, তার কাজ পুনর্নাদে শব্দপ্রাবল্য বাড়ানো। শব্দপেটির পর্দার স্পন্দনে এটির মধ্যে দীর্ঘ এবং সীমিত বায়ুস্তম্ভ কাঁপার ফলেই শব্দপ্রাবল্য বাড়ে। শিঙার বৈশিষ্ট্যের ওপরেই (§১৪-১১) উৎপাদিত শব্দের গুণ বা জাতি অনেকাংশে নির্ভর করে; প্রয়োজনীয় সর্তগুলি হ'ল—(১) শিঙা-কণ্ঠে বায়ু সব কম্পাংকেই সমবেগে কাঁপবে; (২) শিঙা-প্রান্তে শব্দের প্রতিফলন নগণ্য হবে; এবং (৩) সব কম্পাংকেই শক্তি-বিকিরণ চরমমাত্রায় হবে। আগে শংকুশিঙা ব্যবহার হ'ত, এখন উন্নততর সূচকশিঙা তার স্থান নিয়েছে। আজকাল শিঙা, গ্রামোফোনের ভেতরেই থাকে, আগের মতো বাইরে (H.M.V. রেকর্ডে ছবিটি দেখ) নয়।

পিন (N) এবং লেভারের (L) সমন্বয়কে **যান্ত্রিক পিক্-আপ** (চিত্র 18.4*a*) বলা যায়। সাউণ্ড-বক্সের সফল পরিকল্পনাকালে ম্যাক্সফিল্ড ও হ্যারিসন তাঁদের লিপি-মুদ্রকের (cutting head) অনুকরণে প্রতিসম বর্তনীর ধারণা অনুসরণ করেন। সাফল্যের প্রথম ধাপ, পিক্-আপের যান্ত্রিক বাধের সঙ্গে পর্দার এবং তার বাধের সঙ্গে শিঙার যান্ত্রিক বাধের (Zh) সমন্বয় ঘটানো। উচ্চ কম্পাংকে পর্দার স্পন্দন সমগ্রভাবেই হওয়া চাই (নিস্পন্দ রেখা উৎপন্ন হলে, ছদের পাশাপাশি অংশের স্পন্দন বিপরীত দশায় ঘটবে), সুতরাং পর্দার ওপর ভার চাপাতে হবে; সাউণ্ড-বক্সের বায়ুস্তম্ভ সেই যান্ত্রিক জাড্য আনে। এই বায়ুগহ্বরের বাধ শিঙার বায়ুস্তম্ভের বাধের সমান।

চিত্র 18.4(*a*)
শব্দপেটির যান্ত্রিক বর্তনী

গ্রামোফোনের পিন এবং স্পন্দনী-পর্দার মধ্যে লেভারের দীর্ঘতর বাহু (L)

চিত্র 18.4(*b*)
প্রতিসম বিদ্যুৎ-বর্তনী

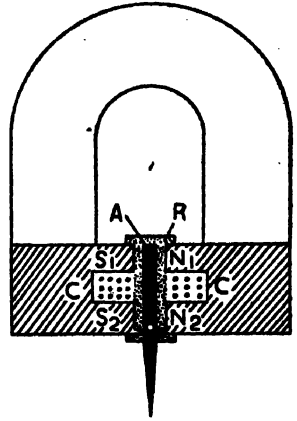
ট্র্যান্সফর্মারের (T_1) কাজ করে, অর্থাৎ বেগ-বিস্তার বাড়ায়। পর্দার কিছুটা নম্যতা (C_2, C_4—C_7) থাকায় এই বাহুটির অল্প নম্যতা (C_3) থাকা চাই। আবার এদের দুই অংশেরই জাড্য আছে—কারণ তাদের নিজেদের ভর (M_1, M_3) আছে। পর্দার কিনারা শক্ত ক'রে আট্‌কানো ; এই কিনারা এবং লেভার-সহ পর্দার মধ্যবিন্দু, স্পন্দন হস্তান্তরে বিকল্প পথের কাজ করে। যে পাল্লায় কম্পাংক উত্তরণ করা হয় তাতে, সংস্থা যাতে যান্ত্রিক রোধের কাজ করে, তাই করার চেষ্টা করা হয় ; ঐ কম্পাংক-পাল্লায় যদি সংস্থার ভূমিকা শুদ্ধ প্রতিক্রিয় হয় তাহলে সে যান্ত্রিক ফিল্‌টারের কাজ করবে। 18.4(*b*) চিত্র সাউণ্ড-বক্সের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনী।

খ. রেডিওগ্রাম : একই অনুলিপি থেকে বৈদ্যুতিক পদ্ধতিতে পুনর্নাদ-যন্ত্রের নাম রেডিওগ্রাম। তাতে সাউণ্ড-বক্সের স্থান নেয় পিক্-আপ আর শিঙার বদলে লাউড-স্পীকার ; রেডিওগ্রামের আর একটি অংশ ভাল্‌ভ্-বিবর্ধক অর্থাৎ অ্যাম্‌প্লিফায়ার।

(১) বৈদ্যুতিক পিক্-আপ : যন্ত্রটিকে একরকম মাইক্রোফোন বলা চলে, তফাৎ এই যে, মাইক সক্রিয় হয় শব্দের চাপভেদে আর পিক্-আপকে চালু করে রেকর্ডের ওপর পিনের যান্ত্রিক স্পন্দন। উদ্ভূত বিভবভেদ স্বনবাহুর মাধ্যমে লাউড-স্পীকারকে সক্রিয় ক'রে শব্দের পুনরুৎপাদন ঘটায়। পিক্-আপ আজকাল দুই শ্রেণীর হয়—বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় এবং চাপবৈদ্যুত।

চলকুণ্ডলী পিক্-আপে পিনের অনুপ্রস্থ স্পন্দন চলকুণ্ডলী মাইক্রোফোনের কুণ্ডলীকে সচল করে। দুয়ের ক্রিয়াপদ্ধতি অভিন্ন। তবে এর কৃতি সন্তোষজনক করা যায়নি।

প্রচলিত **চৌম্বক পিক্-আপে** (চিত্র 18.5) চলচুম্বক-নীতি ব্যবহার করা হয়েছে। এতে N_1S_1 এবং N_2S_2 একটি অশ্বক্ষুর চুম্বকের দু'জোড়া মেরু ; তাদের মাঝে নিয়ত বিদ্যুৎ-ধারাবাহী কুণ্ডলী (CC)। মেরুদের মাঝে কীলকিত

(pivoted) গ্রামোফোন পিন তথা আর্মেচার (A), চৌম্বক বলরেখার পথে থাকে। তার দোলন অবমন্দিত করতে রবারের প্যাড (R) দেওয়া থাকে। অনুলিপির নালীপথে চলাকালে সূচীশীর্ষের অনুপ্রস্থ স্পন্দন হয়; তাতে স্থিরকুণ্ডলী ও আর্মেচারের মধ্যে সংযোগী বলরেখার সংখ্যা ক্রমাগতই বদ্‌লাতে থাকে এবং যথাযথ প্রত্যাবর্তী বিভবভেদের উৎপত্তি হয়। পিক্‌-আপে উদ্ভূত এই বিভবভেদ লাউড-স্পীকারকে সক্রিয় ক'রে বায়ুতে শব্দতরঙ্গ উৎপন্ন করে। অবশ্য অ্যাম্‌প্লিফায়ারে বিভবভেদকে আগেই সম্প্রসারিত ক'রে নেওয়া হয়। CC কুণ্ডলীতে শব্দপ্রাবল্য-নিয়ন্ত্রণের ব্যবস্থাও যুক্ত থাকে। বৈদ্যুতিক পুনর্নাদেই শব্দপ্রাবল্য-নিয়ন্ত্রণ সম্ভব, যান্ত্রিক পুনর্নাদ-ব্যবস্থা—গ্রামোফোনে, তা করা যায় না। স্পষ্টতই চৌম্বক পিক্‌-আপকে একটি ছোটখাটো বৈদ্যুতিক জেনারেটর বলতে পারি। চলচুম্বক এবং চলকুণ্ডলী পিক্‌-আপ যথাক্রমে ট্যানজেণ্ট এবং D' Arsonval গ্যালভ্যানোমিটার-এর মতো ব্যতিহার-নীতি চালিত দুটি বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় যন্ত্র।

চিত্র 18.5—চৌম্বক পিক্‌-আপ

স্ফটিক পিক্‌-আপে সাধারণত রোচেল সল্টের স্ফটিক ব্যবহার করা হয়। যন্ত্রটিকে স্ফটিক-মাইক্রোফোন (§১৫-১২) বলা যায়। কীলকিত পিনের নড়াচড়ায় স্ফটিকের কৃন্তন-বিকৃতি ঘটে; ফলে, তাতে চাপজ বিদ্যুৎ-বিভবভেদ ঘটে। এই বিভবভেদ বিবর্ধক মারফৎ লাউড-স্পীকারে সরবরাহ হয়। এই পিক্‌-আপ যথেষ্ট হাল্‌কা অথচ শক্তিশালী।

দু'ধরনের পিক্‌-আপেই পিনের ঘর্ষণে উদ্ভূত অবাঞ্ছিত শব্দ কমাতে বৈদ্যুতিক ফিল্টার লাগানো হয়। কার্বন-মাইক্রোফোন এবং স্থিরবৈদ্যুত বা ধারক-মাইক্রোফোন নীতিতেও পিক্‌-আপ তৈরি হয়, কিন্তু প্রথমটির উৎপাদ নির্ভরযোগ্য নয়, আর দ্বিতীয়টিতে বড় কম হওয়ায়, তাদের ব্যবহার কম।

(২) লাউড-স্পীকার: রেডিওগ্রামের শেষ অংশটি হ'ল লাউড-স্পীকার। গ্রামোফোনে সাধারণত শিঙাই এই শব্দবিবর্ধকের কাজ করে; সেক্ষেত্রে স্পন্দনশীল পর্দা ক্ষুদ্র, শিঙা দীর্ঘ। রেডিওগ্রামের লাউড-স্পীকারে বিদ্যুৎস্পন্দিত পর্দা বিস্তৃত, শিঙা সাধারণত অনুপস্থিত।

রেডিওগ্রামে বা রেডিওতে সর্বাধিক ব্যবহৃত বিবর্ধক হচ্ছে শংকু-পর্দা (cone diaphragm) চলকুণ্ডলী স্পীকার (§১৫-৫খ)। এক্ষেত্রে পর্দাই শিঙার কাজ করে। চলকুণ্ডলীর বদলে দোললৌহ লাউড-স্পীকারও (চিত্র 15.9d) ব্যবহৃত হয়। যন্ত্রটির গঠন খুবই সরল এবং শক্তপোক্ত।

১৮-৫. চৌম্বক পদ্ধতিতে শব্দের মুদ্রণ এবং পুনর্নাদ :

একটি চৌম্বক উপাদানে নির্মিত ফিতার দৈর্ঘ্য বরাবর শাব্দতীব্রতাভেদ অনুসরণ ক'রে চুম্বকনভেদ ঘটিয়ে শব্দের তরঙ্গরূপ ধ'রে রাখা যায়। ১৯০০ সনে পোলসন প্রথম চৌম্বক তারেতে টেলিগ্রাফের সংকেত ধ'রে রেখে, পরে উদ্ধার করার পদ্ধতি আবিষ্কার করেন—নাম টেলিগ্রাফোন। বর্তমানে ফিতার উপর সংকেত সংরক্ষণ করা হয়—পন্থাটি খুবই জনপ্রিয়।

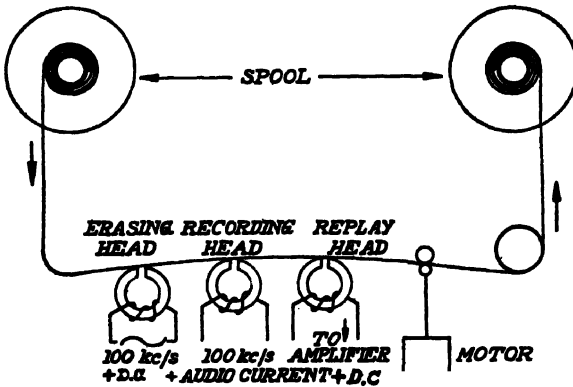
মুদ্রণ এবং পুনর্নাদের চৌম্বক-পদ্ধতির অনেক সুবিধা—(১) মুদ্রণের অব্যবহিত পরেই পুনর্নাদ সম্ভব; (২) দীর্ঘ কার্যক্রম বা সঙ্গীতের আসর অক্লেশে একটানা মুদ্রিত করা যায়; (৩) কোন মুদ্রণ মুছে ফেলে অনায়াসে ঐ ফিতাতেই নতুন মুদ্রণ সম্ভব; (৪) উপাদান দীর্ঘস্থায়ী—একই ফিতা থেকে কয়েকশত বার পুনরুৎপাদন ঘটিয়ে এবং ষাটবারের মতো নতুন নতুন মুদ্রণ করার পরেও ফিতা অবিকৃত থাকতে দেখা গেছে; (৫) 30 থেকে 10^4 হার্ৎজ পর্যন্ত সব কম্পাংকেরই বিশ্বস্ত পুনর্নাদ সম্ভব; (৬) কোন প্রস্ফুটন-প্রক্রিয়ার দরকার হয় না; (৭) মুদ্রণের যেকোন অংশই যেকোন সময়ে মুছে ফেলা যায়; (৮) যেকোন মুহূর্তে বিনা অসুবিধায় মুদ্রণ সুরু বা শেষ করা যায়। এই-সব কারণেই মুদ্রণ বা সম্প্রচার-ব্যবস্থায় এই পদ্ধতিতে মাস্টার-রেকর্ড তৈরি করা বা দৈনন্দিন কাজে টেপ-রেকর্ডিং এত জনপ্রিয় হয়েছে।

টেপ বা চৌম্বক ফিতা : ফিতা-লিপিকরণের পদ্ধতিটির ভিত্তি তার দুই প্রচৌম্বক ধর্মের ওপর নির্ভরশীল—চৌম্বকরক্ষণক্ষমতা (remanence) এবং নিগ্রাহিতা (coercivity); অর্থাৎ চুম্বকিত ক'রে সেই প্রভাব ধ'রে রাখার এবং চুম্বকনের স্ব-অপনয়নের (self-demagnetisation) বিরোধিতা করার ক্ষমতা।

প্রচৌম্বক পদার্থের এই ধর্ম থাকার আগে ইস্পাতের বিশেষত টাংগস্টেন-মিশ্রিত চৌম্বক ইস্পাত দিয়ে ফিতা তৈরি হ'ত। উপাদান উন্নততর করার গবেষণা সমানে চলছে। বর্তমানে ইংলণ্ডে E.M.I. কোম্পানি হাল্‌কা, 0.002″

মোটা ও 0.25″ চওড়া সেল্যুলোজ এসিটেটের ফিতের উপর খুব মিহি, বিশেষভাবে তৈরী Fe_3O_4 গুঁড়ো নিষেক ক'রে টেপ তৈরি করেছেন ; টেপের দৈর্ঘ্য প্রায় 200 মি., বাজে প্রায় 20 মিনিট ধ'রে এবং পাউণ্ডখানেক ওজনের আর ফুটখানেক ব্যাসের একটি কাটিমে (spool) জড়ানো থাকে। প্ল্যাস্টিক ফিতের ওপর পলিভিনাইল ক্লোরাইডের প্রলেপ দিয়ে তার ওপর ঐ ক্লোরাইড এবং Fe_3O_4-এর মিহি গুঁড়ো ছড়িয়ে এখন পর্যন্ত সেরা টেপ তৈরি করা গেছে।

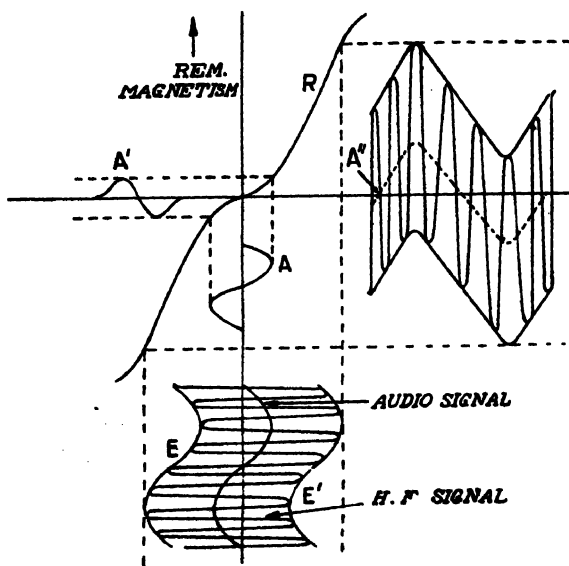
টেপ-রেকর্ডার ঃ বর্তমানে সুপরিচিত এই যন্ত্রটিকে আগে চৌম্বকভাষ (magnetophone) বলা হ'ত (১৯৩০) এবং এর উদ্ভাবক (১৯২৪) স্টিল নামে এক জার্মান এঞ্জিনীয়ার। ফিতার সঙ্গে এরও ক্রমবিবর্তন হয়ে চলেছে। যন্ত্রটি একাধারে শব্দের মুদ্রক ও পুনর্নাদক।

টেপ-রেকর্ডারের (চিত্র 18.6) প্রধান প্রধান অংশ—(১) টেপ-জড়ানোর কাটিম বা রীল ; (২) পরপর তিনটি চৌম্বক-শীর্ষ, যথাক্রমে বিচুম্বকক (eraser),

চিত্র 18.6—টেপ-রেকর্ডার

লিপি-লেখক (recorder) এবং পুনরুৎপাদক ; (৩) সুষমবেগ মোটর ; এবং (৪) মাইক্রোফোন, ভাল্‌ভ্‌-বিবর্ধক এবং স্পীকার। শব্দ-মুদ্রণের সময়ে মোটরের সাহায্যে মিনিটে প্রায় 90 মি. বেগে এক কাটিম থেকে টেপ সমগতিতে তিনটি চৌম্বক-শীর্ষের মধ্যে দিয়ে টেনে নিয়ে অন্য কাটিমে জড়ানো হয় ; পুনর্নাদের সময় টেপের গতি বিপরীতমুখে। মুদ্রণকালে প্রথম দুই চৌম্বক-শীর্ষ মাত্র সক্রিয় থাকে ; পুনরুৎপাদনকালে তারা নিষ্ক্রিয়, সক্রিয়।

(ক) **বিচুম্বকন-শীর্ষ :** এই প্রথম শীর্ষটি উচ্চ কম্পাংকের শক্তিশালী প্রত্যাবর্তী চৌম্বকক্ষেত্রবাহী বিদ্যুৎ-চুম্বক। এই ক্ষেত্রের ক্রিয়ায় টেপের পূর্ববর্তী চুম্বকন বিনষ্ট করা হয়—অর্থাৎ চৌম্বক প্রভাব যেন 'মুছে ফেলা' হয়। আমরা জানি, চুম্বকিত পদার্থকে পরপর ক্রমহ্রস্বমান চৌম্বক-চক্রের মধ্যে দিয়ে নিয়ে যেতে থাকলে ক্রমশ তার চুম্বকন লোপ পেতে থাকে।

এই শীর্ষে দুই মেরুর মধ্যে ফাঁক বেশ বেশী এবং চৌম্বকক্ষেত্রের প্রাবল্য সচল টেপে চৌম্বক সম্পৃক্তি আনতে সক্ষম। যতক্ষণে টেপটি দুই মেরুর মধ্যবর্তী জায়গা অতিক্রম ক'রে যায় ততক্ষণে তার ওপরে ছয় থেকে আটবার চৌম্বক-চক্র আবর্তিত হয়—প্রতিটিই চৌম্বক-সম্পৃক্তি ঘটাতে সক্ষম। সম্পৃক্ত অংশটি শীর্ষ অতিক্রম ক'রে যত এগোতে থাকে ততই তার ওপরে চৌম্বক-চক্রের প্রাবল্য কমতে থাকে ; যতক্ষণে এই প্রাবল্য শূন্যমান হয় ততক্ষণে টেপের সেই অংশ নিশ্চুম্বকিত হয়ে যায়। এইভাবে টেপ পরিষ্কার হয়ে মুদ্রণের উপযোগী হয়।

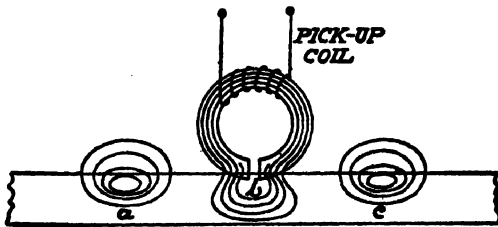
(খ) **মুদ্রক-শীর্ষ :** এই দ্বিতীয় বিদ্যুৎ-চুম্বকটির মেরু-অন্তর অনেক

চিত্র 18.7—ফিতায় শব্দমুদ্রণ

কম ; এতে প্রত্যাবর্তী চুম্বকন প্রবাহের দুটি অংশ—শব্দতরঙ্গসৃষ্ট মাইক্রোফোন-প্রবাহ এবং উচ্চ কম্পাংকের চৌম্বক-প্রস্তুতি (magnetic conditioning)

বা biassing প্রবাহ। প্রথমটি স্বনকম্পাংক (A.F.)-ধারা প্রবাহ, দ্বিতীয়টির কম্পাংক অন্তত 100 কিলোচক্রের মতো। তার কাজ, টেপে আহরিত চুম্বকনের মান স্বনসংকেতের নিমেষমানের সমানুপাতিক করা; তা করতে হলে প্রযুক্ত চৌম্বক-ক্ষেত্র-প্রাবল্য এবং আহরিত চুম্বকনের বক্রের (R) মধ্যে যতটুকু অংশ রৈখিক (চিত্র 18.7), তার মধ্যে চৌম্বক-ফ্লাক্সের চরম ভেদ ঘটাতে হবে। মুদ্রক-শীর্ষে যদি কেবলমাত্র মাইক্রোফোন থেকে স্বনকম্পাংক প্রবাহ (A) আসতো, তাহলে আহরিত চুম্বকনের মান অল্পই হ'ত; কিন্তু সেই প্রবাহের সঙ্গে শক্তিশালী উচ্চকম্পাংকের প্রবাহ মেশালে মিলিত চৌম্বকক্ষেত্রের শীর্ষগুলি R বক্রের রৈখিক অংশের মধ্যেই ওঠা-নামা করে। ছবিতে নিচের অংশে সম্মিলিত চৌম্বকক্ষেত্রের আবরণ (envelope E E′) সাইনীয়-বক্র হিসাবে দেখানো হয়েছে; আহরিত চুম্বকনের আবরণ E_R E_R' এবং তার গড় মান (A″), R-এর রৈখিক অংশে সীমিত থাকায়, সাইনীয় তথা সরল দোলীয় হয়েছে। টেপটি শীর্ষ থেকে সরে যেতে থাকলে আহরিত চুম্বকন স্বনপ্রাবল্যের অনুলিপি হবে; উচ্চ কম্পাংকের চুম্বকন অস্থায়ী এবং তাতে উৎপন্ন শব্দ স্বনোত্তর।

মুদ্রকশীর্ষ অতিক্রান্ত টেপে চুম্বকন, ফিতার দৈর্ঘ্য বরাবর হয় এবং প্রতি বিন্দুতে তার মান আপতিত শাব্দপ্রাবল্যের সমানুপাতিক। এইভাবে শাব্দতরঙ্গের বৈশিষ্ট্য টেপে সংরক্ষিত হয়।

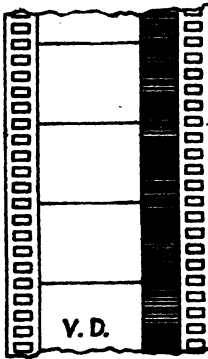
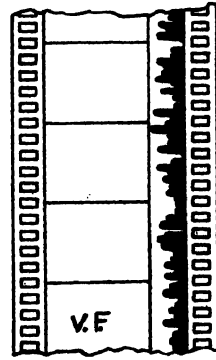
(গ) **পুনর্জনক-শীর্ষ** ঃ শব্দ-মুদ্রিত সচল টেপ এবারে তীক্ষ্ণাগ্র একটি প্রচৌম্বক আংটার সংস্পর্শে আসে; আংটার গায়ে তারের কুণ্ডলী জড়ানো। কুণ্ডলীর দুই প্রান্ত অ্যাম্প্লিফায়ার-সহ লাউড-স্পীকারে যুক্ত। পুনর্নাদের সময়ে টেপ চিত্র-মতো ডান থেকে বাঁয়ে চলতে থাকে। তখন অন্য শীর্ষ-দুটি কিন্তু

চিত্র 18.8—পুনর্জনন (replay)-ব্যবস্থা

নিষ্ক্রিয়। চুম্বকিত টেপের তিনটি ক্ষুদ্রাংশের চৌম্বক-ফ্লাক্স 18.8 চিত্রে দেখানো হয়েছে; *a* এবং *c* অংশে তারা বায়ু-মাধ্যমে যুক্ত। কিন্তু *b* অংশে

আংটার সংস্পর্শে থাকায়, ফ্লাক্স-রেখাগুলি তার মধ্যে দিয়েই পথ সম্পূর্ণ করেছে। সুতরাং টেপ-চলাকালে ভিন্ন ভিন্ন অংশের ভিন্ন ভিন্ন চুম্বকন, আংটায় ফ্লাক্স-ভেদ ঘটিয়ে পিক্-আপ-কুণ্ডলীতে পরিবর্তী বিভবভেদ উৎপন্ন করে। সেই প্রবাহ বিবর্ধিত হয়ে লাউড-স্পীকার-পর্দায় স্পন্দন ঘটিয়ে বায়ুতে মূল শব্দতরঙ্গের অনুরূপ শব্দ জাগাবে।

মুদ্রণের অব্যবহিত পরেই টেপ-রেকর্ডারের মোটর উল্টোদিকে ঘুরিয়ে দিয়ে শব্দ তখনই বা পরে ইচ্ছামতো শোনা যেতে পারে। গান, ভাষণ, খেলার বর্ণনা এইভাবে সংরক্ষিত ক'রেই রেডিওতে পরে শোনানো হয়।

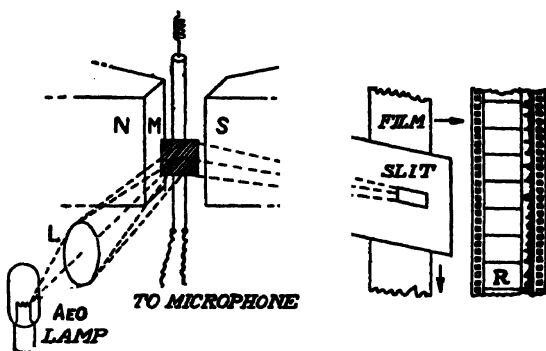
১৮-৫. চলচ্চিত্রে শব্দমুদ্রণ :

'টকি' বা সবাক-চলচ্চিত্রে শব্দমুদ্রণ আলোর সাহায্যে করা হয়। সাধারণ 35 মিমি সিনেমা ফিল্মের একপাশে 2.5 মিমি জায়গা শব্দলেখনের জন্য রাখা থাকে ; তাকে শাব্দসরণী (sound track) বলে। শাব্দসরণীতে

চিত্র 18.9(*a*) চলচ্চিত্রে শাব্দসরণী চিত্র 18.9(*b*)

শব্দমুদ্রণ দু'ভাবে করা যেতে পারে—(ক) মুদ্রণে ক্ষেত্রের সবটাই আলোকিত —তার ওপরে ভিন্ন ভিন্ন স্বচ্ছতা-বিশিষ্ট অনুপ্রস্থ সমান্তরাল রেখা [চিত্র 18.9(*a*)] আর (খ) মুদ্রণ-ক্ষেত্রের আলোকিত অংশের ক্ষেত্রভেদ [চিত্র 18.9(*b*)]। প্রথমটিকে **পরিবর্তী-ঘনত্ব** এবং দ্বিতীয়টিকে **পরিবর্তী-ক্ষেত্র** মুদ্রণ-প্রণালী বলে। দুই শ্রেণীর পরিবর্তনের মধ্যেই শব্দের তরঙ্গরূপ সংরক্ষিত থাকে।

18.9(*a*) চিত্রে অনুপ্রস্থ রেখাগুলি আসলে একটি আলোকিত রন্ধ্রের (slit) প্রতিচ্ছবি। আপতিত শাব্দচাপ-জনিত মাইক্রোফোন-প্রবাহ এই

আলোকপ্রাবল্য নিয়ন্ত্রিত করে। এই নিয়ন্ত্রণ আবার (১) উৎসের প্রাবল্য বদ্‌লে বা (২) রন্ধ্রের বেধ বদ্‌লে করা যায়। প্রথমটি **পরিবর্তী-ক্ষেত্র**, দ্বিতীয়টি **পরিবর্তী-ঘনত্ব** মুদ্রণ-প্রণালী।

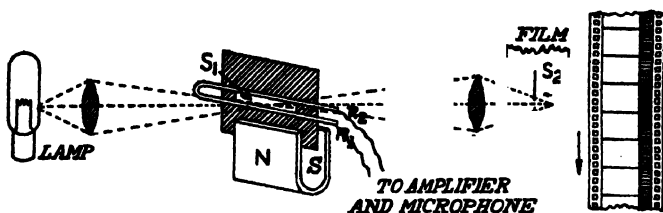
ক. পরিবর্তী-ক্ষেত্র শব্দমুদ্রণে উৎসপ্রাবল্য বদ্‌লাতে ডাডেল দোলন-লিখ্ (চিত্র 18.10) ব্যবহার করা হয়। এখানে একটি AEO-বাতি

চিত্র 18.10—পরিবর্তী-ক্ষেত্র শব্দ-মুদ্রণ-ব্যবস্থা

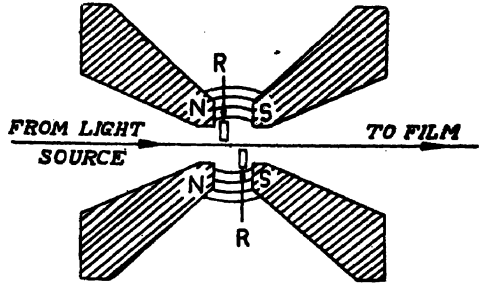
উৎস; বাতিটি হিলিয়ম গ্যাস সমন্বিত একটি বিদ্যুৎক্ষরণ নল। এই যন্ত্রে একটি জোরালো অনুপ্রস্থ চৌম্বকক্ষেত্রে (NS) পাতলা একটি ধাতুর রিবন লুপের আকারে ঝোলানো থাকে; তার গায়ে M একটি আয়না। মাইক্রোফোন-ধারা লুপে চলতে থাকলে ধারা-দিক্ অনুসারে লুপের বিক্ষেপ হয়। L লেন্‌সে সংহত হয়ে AEO বাতির কিরণ M থেকে অনুভূমিক রন্ধ্রের উপর এসে পড়ে; তার মধ্যে দিয়ে গিয়ে এরপর নিম্নমুখে সচল ফিল্‌মে পড়ে। M-এর নড়াচড়ায় রন্ধ্রের কম-বেশী অংশ আলোকিত হয়। ফলে, ফিল্‌মে পরপর সমান্তরালে অনুলিপি মুদ্রিত হয়ে চলে। আলোর প্রাবল্য শাব্দ-প্রবাহের মাত্রা অনুযায়ী পরিবর্তিত হতে থাকায়, প্রতিচ্ছবিগুলিতে বিজারণ-জনিত রূপার অবক্ষেপের (deposition) ঘনত্বও কম-বেশী হতে থাকে। সুতরাং ফিল্‌ম্ পরিস্ফুটিত হলে উজ্জ্বলতম প্রতিচ্ছবি গাঢ়তম হয়ে প্রকাশ পায়। ফিল্‌মের পজিটিভ প্রিণ্টে ভিন্ন ভিন্ন অনচ্ছতার ক্ষেত্রাংশ পাওয়া যায়। ডানদিকে (R) শাব্দ-সারণীতে এই পরিবর্তী ক্ষেত্রাংশই মুদ্রিত শব্দরূপ।

দুর্ভাগ্যক্রমে (১) আলোকপ্রাবল্য দুর্বল হওয়ায় এবং (২) আলোকপ্রাবল্য ও বিদ্যুৎপ্রবাহের মধ্যে রৈখিকতার অভাব থাকায় সব কম্পাংককে সাড়া বিশ্বস্ত নয়;

তাই শব্দমুদ্রণের এই পদ্ধতি খুব সফল হয়নি। উল্লেখযোগ্য যে, অনেক আগে (১৯০০) রুহ্‌মার নামে এক বিজ্ঞানী দিষ্ট বৈদ্যুতিক আর্ক-উদ্ভূত ক্ষরণের ওপর মাইক্রোফোন-জাত প্রত্যাবর্তী শাব্দ-প্রবাহ যোগ ক'রে আলোর প্রাবল্যে পরিবর্তন ঘটিয়ে আলোকচিত্রে শব্দ-মুদ্রণের সূত্রপাত করেছিলেন।

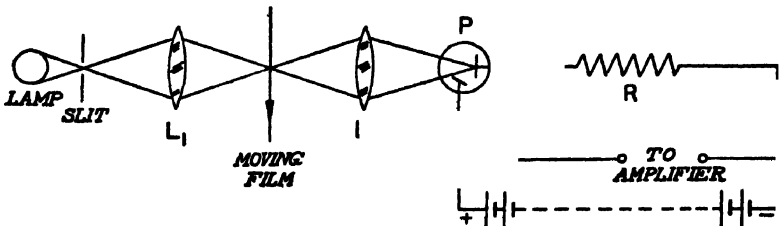
খ. পরিবর্তী-ঘনত্ব শব্দ-মুদ্রণ : আলোকপ্রাবল্য বদ্‌লানোর বিকল্প পন্থা কোনরকমের **আলোক-কপাটিকা** (light valve) ব্যবহার করা; তার ক্রিয়া মাইক্রোফোন-প্রবাহ-নিয়ন্ত্রিত। এই পন্থায় খুব জোরালো আলোক-

চিত্র 18.11(*a*)—পরিবর্তী-ঘনত্ব শব্দ-মুদ্রণ-ব্যবস্থা

প্রভবের ব্যবহার এবং আলোক-প্রবাহের বিস্তৃতপাল্লায় প্রাবল্য-প্রেরণ সম্ভব। 18.11(*a*) চিত্রে এক শ্রেণীর আলোক-কপাটিকা দেখানো হয়েছে। এক্ষেত্রে মাইক্রোফোন-প্রবাহ একটি **দীর্ঘ রন্ধ্রের প্রস্থে পরিবর্তন** ঘটিয়ে উত্তারিত আলোয় প্রাবল্যভেদ আনে। রন্ধ্রটি (S_1) ডুর‍্যালুমিনের পাতলা পাতের লুপের (R_1, R_2) মধ্যে থাকে। সেই লুপটি শক্তিশালী অনুপ্রস্থ চৌম্বকক্ষেত্রে (NS) থাকে এবং মাইক্রোফোন-প্রবাহ বহন করে। আলো পাঠাবার প্রয়োজনে চৌম্বক-মেরুতে ছিদ্র করা থাকে। মাইক্রোফোন-প্রবাহ-বাহী লুপের ওপর চৌম্বকক্ষেত্রের ক্রিয়ায় চলবৈদ্যুত বল উৎপন্ন হয়ে রন্ধ্রবেধ বদ্‌লায়। কাজেই প্রেরিত আলোক-কিরণের প্রস্থ তথা প্রাবল্যও পরিবর্তিত হয়। রন্ধ্রের স্বাভাবিক প্রস্থ 0.002″ ; জোরালো উৎসের প্রতিবিম্ব লেন্‌সের সাহায্যে রন্ধ্রে ফেলা হয় এবং তার থেকে উত্তারিত আলো L লেন্‌সের সাহায্যে আর একটি স্থিরপ্রস্থ (S_2) রন্ধ্রের ওপর ফেলা হয়। এই রন্ধ্রের প্রতিচ্ছবি ফিল্‌মের ওপর পড়ে এবং নিম্নমুখী ফিল্‌মের উপর ভিন্ন ভিন্ন অনচ্ছতার সমান্তরাল রেখা (0·001″ চওড়া) মুদ্রিত হতে থাকে; প্রতি সেমি দৈর্ঘ্যে তাদের সংখ্যাও আলাদা হয়। রেখার অনচ্ছতা, প্রাবল্যের এবং সেমি-প্রতি রেখার সংখ্যা, কম্পাংকের নির্দেশক। উচ্চ কম্পাংকে রিবনের জড়তা অসুবিধা ঘটায়।

18.11(b) চিত্রে আরও উন্নত ধরনের আলোক-কপাটিকা দেখানো হয়েছে ; এতে 0.5 মিল বেধের, 6 মিল চওড়া এবং 1" লম্বা দুটি রিবন (RR) সামান্য তফাতে থাকে ; নিষ্প্রবাহ অবস্থায় তাদের মধ্যে তফাৎ 1 মিল (0.001") । মাইক্রোফোন থেকে বিবর্ধিত শাব্দ-প্রবাহ একটি রিবন ধ'রে ওঠে, অপরটি ধ'রে নামে এবং তারা দু'জোড়া শক্তিশালী চুম্বকের মেরুসজ্জার মধ্যে থাকে । উত্তরিত আলোক-প্রাবল্য RR-এর মধ্যে পরিবর্তী দূরত্ব দিয়ে নিয়ন্ত্রিত এবং তা যাতে রিবনে প্রবাহের সমানুপাতিক হয়, সে ব্যবস্থা করা হয় । 18.9(a) চিত্রে ফিল্মে এই পদ্ধতিতে মুদ্রিত শাব্দ-সরণী দেখানো হয়েছে ।

চিত্র 18.11(b)—আলোক-কপাটিকা (valve)

১৮-৬. মুদ্রিত আলোকচিত্র থেকে পুনর্নাদ :

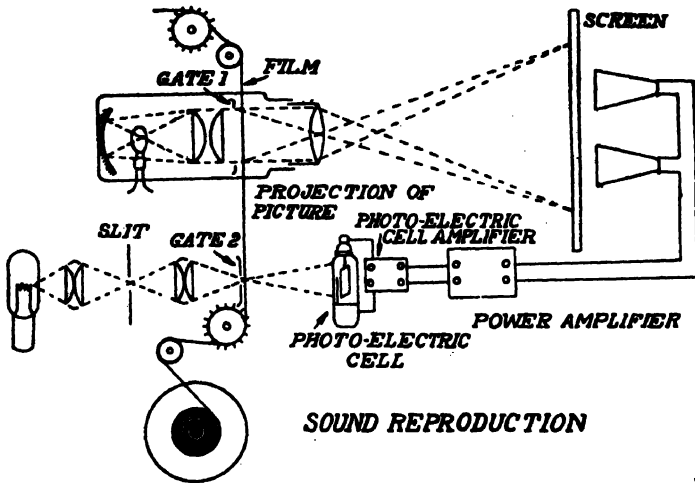
আর্ক বাতির সাহায্যে রুহ্‌মার প্রথম শব্দের আলোকচিত্র-মুদ্রণ করেছিলেন ; মুদ্রিত শব্দের পুনর্নাদ ঘটাতে তিনি স্থির ঔজ্জ্বল্যের আর্কের সামনে মুদ্রিত ফিল্ম চালিয়ে নির্গত আলো একটি সেলেনিয়াম কোষে ফেলেন । ফিল্ম-উত্তরিত আলোর হ্রাসবৃদ্ধির ফলে উৎপন্ন পরিবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহ একটি লাউড-স্পীকারকে সক্রিয় করে । বর্তমানে শব্দমুদ্রিত আলোক-ফিল্ম থেকে শব্দ-পুনরুৎপাদনের পন্থা এই মূলনীতিরই অনুসারী ।

মুদ্রণের দুই পন্থা ভিন্ন হলেও শব্দ-পুনরুৎপাদনের পদ্ধতি (চিত্র 18.12)

চিত্র 18.12—শব্দ-মুদ্রিত ফিল্ম্ থেকে পুনর্নাদ

একই । জোরালো দীপক থেকে, লেন্সের সাহায্যে দীর্ঘ রন্ধ্রের ওপর আলো সংহত ক'রে, তাকে উদ্ভাসিত করা হয় । সেই আলো লেন্সের সাহায্যে

সচল ফিল্মের শাব্দ-সরণীর ওপর ফেলা হয় ; L_2-র সাহায্যে পুনরুত্তারিত আলো আলোক-বৈদ্যুত কোষের সক্রিয় তলের (P) ওপরে সংহত করলে, আলোর প্রাবল্য অনুযায়ী উৎপন্ন ইলেকট্রন-ধারা, কোষের অন্য পাতে প'ড়ে পরিবর্তী প্রবাহ সৃষ্টি করে। সেই প্রবাহ উচ্চরোধের (R) দুই প্রান্তে আলোক-প্রাবল্যের সমানুপাতিক বিভবভেদ ঘটায়। ভাল্‌ভ্‌-অ্যামপ্লিফায়ার তাদের বিবর্ধিত ক'রে লাউড-স্পীকারে পাঠায়।

আলোক-কোষের (P) সক্রিয় তল সিজিয়াম-অক্সিজেন-রূপায় প্রলেপিত। রঙীন ছবিতে মাঝে মাঝে সিজিয়াম-অ্যাণ্টিমনির আলোক-সচেতন তলও ব্যবহার করা হয়।

সিনেমাতে কিন্তু, আলোকচিত্রের দ্বার (picture gate) এবং শাব্দ-সরণীর দ্বার (sound gate) একই অনুভূমিক তলে থাকে না ; প্রায় $14\frac{1}{2}''$

চিত্র 18.13—সিনেমা-পর্দায় মুদ্রিত শব্দের প্রকাশ

আগে-পিছে থাকে। সিনেমাতে ছবি এবং শব্দ-পুনরুৎপাদনের ব্যবস্থা 18.13 চিত্রে দেখানো হয়েছে।

সিনেমার পর্দায় ছবি ফেলার সময় তারা থেমে থেমে চলে ; এক একটি ছবি চিত্রদ্বারের সামনে $\frac{1}{18}$ সেকেণ্ড থেমে থাকে, তারপর উঠে যায়। কিন্তু শাব্দ-সরণী সুষমবেগে চলে ব'লে শব্দ সমানেই হতে থাকে। ছবির অভিক্ষেপ

এবং পুনর্নাদে সমলয় (synchronisation) রাখার জন্যেই স্বনধার, চিত্রধার থেকে তফাতে থাকে। ছবি-তোলা এবং শব্দমুদ্রণ আলাদা আলাদা ভাবে ক'রে, একই ফিল্মে তাদের ঠিক দূরত্ব বজায় রেখে পজিটিভগুলি মুদ্রিত করা হয়। ফিল্মটি সমবেগে এক রীল থেকে অন্য রীলে চলতে থাকে। পর্দার পেছনে চারটি লাউড-স্পীকার যোগ্য অবস্থানে বসিয়ে চিত্রগৃহে শব্দের সুষ্ঠু বণ্টনের ব্যবস্থা করা হয়।

প্রশ্নমালা

১। ফোনোগ্রাফের কার্যনীতি বর্ণনা কর। আধুনিক গ্রামোফোন-যন্ত্রের গঠন ও কার্যপ্রণালী লেখ। এতে ব্যবহৃত রেকর্ডে শব্দসংরক্ষণ ও পুনঃপ্রচার কি-ভাবে হয়? ফোনোগ্রাফ রেকর্ডের সঙ্গে এর তুলনা কর।

২। গ্রামোফোন-রেকর্ডার এবং সাউণ্ড-বক্সের বর্ণনা দাও এবং তাদের প্রতিসম বৈদ্যুতিক বর্তনীর আলোচনা কর।

৩। চলচ্চিত্রে শব্দ-সংগ্রহণ এবং পুনঃপ্রচারের সংক্ষিপ্ত বিবরণ দাও।

৪। শব্দ-সংরক্ষণের যান্ত্রিক, বৈদ্যুতিক এবং চৌম্বক পদ্ধতিগুলি সম্পর্কে বিস্তারিত আলোচনা কর।

৫। "শব্দ-সংরক্ষণ বলতে শব্দের তরঙ্গরূপ ধরে রাখা বোঝায়"—উক্তিটির ব্যাখ্যা কর এবং শব্দ-সংরক্ষণের যেকোন পন্থা অনুসরণ ক'রে এর যাথার্থ্য প্রতিপন্ন কর।

৬। ফনোগ্রাফ ও টেলিফোনের কার্যপদ্ধতি তুলনা কর।

৭। পিক্-আপ্ বলতে কি বোঝ? তাদের ক্রিয়াপ্রণালী বর্ণনা কর এবং কৃতি সম্বন্ধে তুলনামূলক আলোচনা কর।

১৯
সৌধস্বনবিদ্যা
(Architectural Acoustics)

১৯-১. সূচনা :

থিয়েটার, সিনেমা, জলসা প্রভৃতি অবসরবিনোদনের ব্যবস্থা বড় বড় হল্‌ঘরে হয়। স্কুল, কলেজ ও বিশ্ববিদ্যালয়ে বক্তৃতা বা সাংস্কৃতিক জমায়েতও হল্‌ঘরে হয়। তা ছাড়া বিদ্যায়তন মাত্রেই বড় বড় ক্লাস-ঘর থাকে। এইসব ঘরে বক্তৃতা বা গানবাজনার শব্দ যাতে সর্বত্র সমভাবে শ্রোতার কাছে পৌঁছায়, কথায় বা গানে বা বাজনায় কোনরকম বিকৃতি, অস্পষ্টতা বা অসঙ্গতি যাতে না ঘটে, তার জন্যে এদের সুষ্ঠু পরিকল্পনামতো নির্মাণ করা দরকার। শ্রবণাগারে (auditorium) সুশ্রবণের জন্য নির্মাণ-পন্থা-বিশ্লেষণকে **সৌধস্বনবিদ্যা** বলে। যেকোন বদ্ধ কক্ষে কোন শব্দ হলে তা চারিদিকে ছড়িয়ে পড়ে এবং সব দিকের দেয়াল, মেজে, আসবাবপত্র, শ্রোতা প্রভৃতি সবরকম সম্ভাব্য প্রতিফলক থেকে বিক্ষিপ্ত হয়; সুতরাং ঘরের কোন নির্দিষ্ট বিন্দুতে শব্দশক্তির পরিমাণ, সময়ের সঙ্গে পরিবর্তিত হয়, আর যেকোন নির্দিষ্ট মুহূর্তে ঘরের ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় শব্দশক্তির বণ্টন ভিন্ন মানের থাকে। কাল এবং স্থান সাপেক্ষে কোন কক্ষে শব্দশক্তির বণ্টন সেই ঘরের আকার, মূলশব্দের গঠন ও স্থায়িত্ব-কাল, সময় এবং ভিন্ন ভিন্ন প্রতিফলক-তলের আকার, অবস্থান, প্রতিফলন ও শোষণ-ক্ষমতার ওপর নির্ভর করে। কাজেই বক্তা, গায়ক, বাদক বা নট-নটীর প্রচেষ্টার চারু শ্রবণ এবং উপলব্ধির জন্য ঘরের আয়তন, আকার, প্রতিফলক-তলগুলির অবস্থান-বিন্যাস, উপাদান এবং সজ্জার জন্য কতকগুলি প্রতিপাল্য সর্ত থাকে, সেগুলির বিশ্লেষণ ও রূপদান আবশ্যিক।

১৯.২. সুচারু শ্রবণের প্রয়োজনীয় সর্তাবলী :

শ্রবণাগারের শাব্দবৈশিষ্ট্য ভালো ব'লে বিবেচিত হতে হলে নিচের সর্তগুলি পূরণ হওয়া চাই—

(১) উচ্চারিত প্রতিটি শব্দাংশ (syllable) কক্ষের সর্বত্রই যথেষ্ট রকম শ্রুতিগোচর ও বোধগম্য হওয়ার মতো শক্তিশালী হবে।

(২) প্রতিটি শব্দাংশের প্রাবল্য সময়সাপেক্ষে এমন হারে কমবে যে পরবর্তী শব্দাংশটি পরিষ্কারভাবে বোঝা যাবে—অর্থাৎ কক্ষে অণুরণনের মাত্রা কম হবে।

(৩) আবার, শব্দের বোধগম্যতা অক্ষুণ্ণ রাখতে ঘরে কিছুটা প্রতিধ্বনি থাকা দরকার; সেই প্রতিধ্বনি প্রয়োজনের বেশী হবে না।

(৪) ঘরের সর্বত্রই শব্দশক্তির বণ্টন সুষম থাকবে; কোথাও শব্দপ্রাবল্য বেশী, কোথাও কম, কোথাও বা নীরবতা যেন না ঘটে।

(৫) উৎপন্ন শব্দ জটিল হলে, তার কোন একটি উপসুর যেন বেশী মাত্রায় বলবান না হয়; হলে, শ্রুত শব্দের স্বনজাতি বদ্‌লে যাবে।

(৬) বহিরাগত বা অবান্তর শব্দ, আভ্যন্তরীণ অনুনাদ, সোপান (echelon) প্রতিফলন বা বিক্ষেপণ প্রভৃতি শব্দপ্রাবল্যের সুষ্ঠু বণ্টনের পরিপন্থী; এদের নিরসন দরকার।

বড় প্রেক্ষাগৃহ বা শ্রবণাগার নির্মাণ পরিকল্পনায় এসব সর্ত পালনের দিকে নজর দেওয়া খুবই দরকার। ঘরে কিছুটা প্রতিধ্বনি বা অণুরণন দরকার—না হলে, শব্দ দ্রুতহারে ক্ষীণ হয়ে যায়; সুতরাং বক্তাকে চেঁচাতে হয়, গায়ককে উচ্চগ্রামে গাইতে হয়, বাদকের পশ্চাৎপট (background) থাকে না। এইরকমের ঘরে শোষণ দ্রুত হয় এবং এদের **নিষ্প্রাণ** ঘর বলে। উপযুক্ত পরিমাণ (optimum) অণুরণন এঁদের সবারই এবং শ্রোতাদের কাছেও বিশেষ সুখকর এবং স্বাচ্ছন্দ্যের কারণ। সেইজাতীয় ঘরকে **প্রাণবন্ত** বলে। প্রসঙ্গত, শ্রোতাদের উপস্থিতিতে যে কক্ষ প্রাণবন্ত (living), তাদের অনুপস্থিতিতে সেই ঘরই নিষ্প্রাণ (dead) হয়ে পড়ে।

১৯-৩. শ্রবণাগার-পরিকল্পনায় প্রতিপাল্য সর্তাবলী:

ঘরে শব্দের অসম বণ্টন বন্ধ করাই এইজাতীয় পরিকল্পনার মূল লক্ষ্য। সেইজন্যে শব্দের অনুরণন এবং শোষণ দুয়ের সামঞ্জস্যবিধান করতে হবে—দুটিকেই যথাপ্রয়োজন নিয়ন্ত্রণ করা দরকার।

অনুরণন এবং শোষণ: অল্প সময়ের ব্যবধানে একই মূলশব্দের পৌনঃপুনিক প্রতিধ্বনি কানে পৌঁছে অনুরণনের অনুভূতি জাগায়। কোন এক ক্ষণিক শব্দ কানে পৌঁছলে, তার রেশ অন্তত 0.1 সে কাল ধ'রে থাকে; এই সময়কে **শ্রুতিনির্বন্ধকাল** বলে। এই সময়ের মধ্যে আর একটি শব্দ কানে

এলে দুটিকে আলাদাভাবে অনুভব করা যায় না, একটানা ব'লে মনে হয়। এখন, যদি পরপর অনেকগুলি শব্দ 0.1 সে সময়ের কম অন্তরে কানে এসে পড়তে থাকে তাহলে তাদের দীর্ঘস্থায়ী ও নিরবচ্ছিন্ন ব'লে বোধ হয়। বাদল-মেঘের গুরুগুরু-ধ্বনির উৎপত্তি এইভাবেই ঘটে। এই ঘটনাকে **অনুরণন** বলে।

কোন সীমাতলে শব্দতরঙ্গ পড়লে, সব তরঙ্গের মতোই দ্বিতীয় মাধ্যম কিছু শক্তি আত্মসাৎ করে এবং সামান্য উত্তপ্ত হয়। এই ঘটনাকে শব্দশোষণ বলে। শোষণের মান আপতন-কোণ এবং মাধ্যমের উপাদানের ওপর নির্ভর করে। লম্ব-আপতন হলে কোন পদার্থে শোষিত শক্তির এবং আপতিত শক্তির অনুপাতকে ঐ পদার্থের **শব্দশোষণ গুণাংক** বলে। তাকে আপতন-ক্ষেত্রের ক্ষেত্রফল দিয়ে গুণ ক'রে সেই তলের **শোষণ** মাপা হয়।

নির্মিত কক্ষে সুষ্ঠু শ্রবণের জন্য, অনুরণন নিয়ন্ত্রণ এবং স্থাপত্য-বৈচিত্র্যের দিকে বিশেষ নজর দেওয়া দরকার।

(১) অনুরণন-নিয়ন্ত্রণ : অনুরণন কমাতে শব্দশোষণ বাড়ানো দরকার। তার জন্য খোলা জানলা এবং দেয়ালে শব্দশোষক পদার্থ বসানো যেতে পারে। খোলা জানলা পূর্ণ শোষকের কাজ করে, কেননা তাদের মধ্যে দিয়ে শব্দ বেরিয়ে যায়। দেয়ালে সচ্ছিদ্র নরম জিনিস থাকলে ছিদ্রমধ্যের বায়ুকোষগুলি শব্দের অনেকখানিই আত্মসাৎ করে। তাই প্রেক্ষাগারের দেয়ালে ফেল্ট, কার্ডবোর্ড, সেলোটেক্স, অ্যাসবেস্টস প্রভৃতির আস্তরণ থাকলে, কিম্বা বহু ভাঁজের ভারী মোটা নরম পর্দা, পুরু কোরা কাপড়, বড় বড় অয়েলপেন্টিং বা ম্যাপ ঝোলানো থাকলে শব্দশোষণের কাজ ভালোই হয়। আবার প্রেক্ষাগৃহের আসনগুলিতে গদি ও ঝালর দেওয়া থাকলেও শব্দশোষণ বাড়ে। এ-ছাড়া সৌন্দর্যভূষণের খাতিরে দেয়ালগাত্র অমসৃণ করা হলে বা ছবি খোদাই করা থাকলে বা ম্যুরাল পেন্টিং থাকলে শব্দের ইতস্তত বিক্ষেপণ ঘটে আর তাতে নিয়মিত প্রতিফলনের সম্ভাবনা কমে যায়।

প্রেক্ষাগৃহ পূর্ণ থাকলে শোষণ ভালো হয়—এক এক জন শ্রোতা 4.7 বর্গফুট পরিমিত খোলা জানালার সমান শোষণ ঘটান। পরিচ্ছদ-পারিপাট্যের কারণে শব্দশোষক হিসাবে স্ত্রীলোক পুরুষের তুলনায় শ্রেয়।

(২) স্থাপত্য-বৈচিত্র্য : কক্ষের দেয়াল বা ছাদের আকার বক্রতল না হওয়াই বাঞ্ছনীয় ; হলে, তাদের অভিসারী ক্রিয়ায় কোথাও শব্দ কেন্দ্রীভূত হবে, আবার কোথাও বা ব্যতিচার হয়ে নীরবতা-অঞ্চল প্রতিষ্ঠিত হবে। অনেক

প্রেক্ষাগৃহেই অবতলাকার পশ্চাৎপ্রাচীর অবাঞ্ছিত, এবং বিলম্বিত প্রতিধ্বনি ঘটায়। ছাদ ও এইজাতীয় প্রাচীরের মধ্যে ছাদের খানিকটা শেল্‌ফের মতো প্রসারণ ঘটিয়ে এই অসুবিধা দূর করা যায়।

স্থাপত্য-শোভার কারণে ব্যবহৃত গম্বুজ, গোল খিলান, ঢেউ-খেলানো ছাদ বা দেয়াল—সুশ্রবণের পরিপন্থী, সুতরাং পরিত্যাজ্য। কারণ এগুলি শব্দের অসম-বণ্টন ঘটায়। ঝুলবারান্দা (balcony) থাকলে, তার প্রসার কম এবং ওপরের দিকে ফাঁকা-উচ্চতা, প্রসারের তুলনায় বেশী হওয়া ভালো।

এ-ছাড়া ছাদ আর পাশের দেয়ালগুলির মধ্যবর্তী কোণগুলি স্থূলকোণ হওয়া উচিত। তাহলে কক্ষ বড় হলেও প্রতিফলিত শব্দ শেষ পর্যন্ত যথেষ্ট মাত্রায় পৌঁছে সেখানে প্রয়োজনীয় শব্দপ্রাবল্য প্রতিষ্ঠা করতে পারে। বক্তৃতামঞ্চের পাশের দেয়ালগুলি কঠিন, মসৃণ ও সমান্তরাল হলে, তাদের থেকে বিক্ষুব্ধ প্রতিধ্বনি (flutter) ঘটে। দেয়ালগুলি অপসারী বা হেলানো হলে বা বিক্ষেপী উপাদানে আবৃত থাকলে, এই ত্রুটি থাকে না।

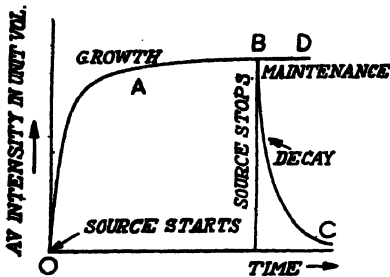
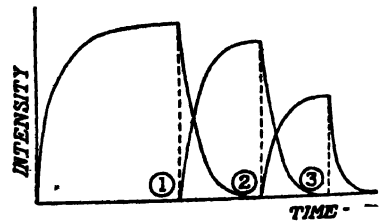
বক্তার পেছনের দেয়াল কঠিন, মসৃণ ও পরবলয়াকার হলে এবং তিনি তার নাভিতে (focus) থাকলে, প্রতিফলিত শব্দপ্রবাহ অবিঘ্নিতভাবে প্রত্যক্ষ শব্দতরঙ্গের অক্ষের সমান্তরালে, সোজা সামনের দিকে যায়; কাজেই অনেক দূর পর্যন্ত পৌঁছতে পারে।

১৯-৪. কক্ষে অনুরণন-প্রক্রিয়া :

বড় একটি ঘরে ক্ষণশব্দ করা হলে, শব্দতরঙ্গ চারিদিকে ছড়িয়ে পড়বে এবং চারিদিকের দেয়ালে একটির পর একটি প্রতিফলন হতে থাকবে। ফাঁকা ঘরে শ্রোতা প্রথমে একটি প্রত্যক্ষ ক্ষণশব্দ শুনবেন এবং তারপর ক্রমান্বয়ে একের পর এক মৃদু থেকে মৃদুতর প্রতিফলিত শব্দ শুনতে পাবেন। যতক্ষণ না শোষণ এবং ঘর্ষণের ফলে আদি শব্দের সমস্ত শক্তির অপচয় ঘটে, ততক্ষণই শব্দ কানে আসতে থাকবে। অতএব যতক্ষণ না শব্দপ্রাবল্য শ্রবণসীমার নিচে চলে যায়, ততক্ষণই একটি মাত্র ক্ষণশব্দের বদলে শ্রোতা একটানা শব্দ শুনতে পাবেন। এই একটানা শব্দের জন্যেই বড় ফাঁকা ঘর গম্‌গম্ করে—তাকেই অনুরণন বলে। বন্ধ ঘরে ক্ষণশব্দের পৌনঃপুনিক প্রতিফলনের দরুন শ্রবণ-অনুভূতি যতকাল স্থায়ী হয়, সেই সময়কে **অনুরণন-কাল** বলে। কক্ষের শাব্দ-পরিকল্পনায় এই রাশিটিই সর্বাধিক গুরুত্বপূর্ণ।

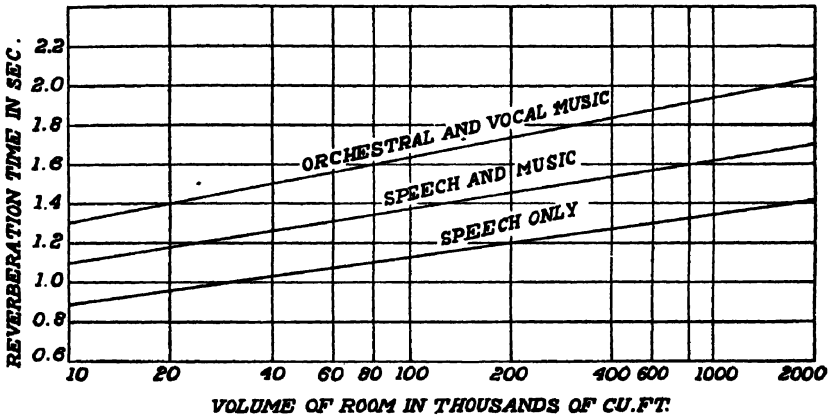
বিজ্ঞানের এই শাখায় গবেষণার পথিকৃৎ, অধ্যাপক স্যাবাইন-এর

সংজ্ঞানুসারে, পৌনঃপুনিক প্রতিফলনের ফলে শব্দ ক্ষয় হয়ে যতক্ষণে তার আদি প্রাবল্যের দশ লক্ষ ভাগের এক ভাগে পৌঁছয়, সেই সময়কে অনুরণন-কাল বলে। ক্ষণশব্দের উৎপত্তি-মুহূর্ত থেকে টানা শব্দ থামার মুহূর্ত পর্যন্ত তাকে গণনা করা হয়। অনুরণন-কাল দীর্ঘ হলে প্রতিফলিত শব্দ পরবর্তী প্রত্যক্ষ শব্দাংশ বোঝার ব্যাপারে বাধা ঘটায়; আবার অনুরণন স্বল্পস্থায়ী হলে, ঘর 'নিষ্প্রাণ' মনে হয়। দুই-ই অবাঞ্ছিত।

এখন ধরা যাক, ঐ ঘরে একটি অক্ষুণ্ণপ্রাবল্য স্বনক বেজে চলেছে। দেয়ালগুলিতে শোষণ না হলে শক্তিক্ষয় মোটেই হবে না এবং ঘরের যেকোন এক স্থানে, প্রতিফলনের দরুন শক্তিঘনত্ব এবং শব্দপ্রাবল্য বেড়েই চলবে। আবার দেয়ালগুলিতে পূর্ণশোষণ ঘটলে প্রতিফলন মোটেই হবে না; তখন ব্যাপারটা খোলা জায়গার (অর্থাৎ দেয়ালগুলি যেন নেই) মতো হয়ে দাঁড়াবে—কোন বিন্দুতে শব্দপ্রাবল্য স্বনক থেকে তার দূরত্বের বর্গের ব্যস্তানুপাতিক হবে। কিন্তু সব কক্ষেই এই দুই ঘটনাই অর্থাৎ প্রতিফলন ও শোষণ, কম-বেশী পরিমাণে হয়। ফলে, প্রথম দিকে (19.1 চিত্রে OA) শ্রোতার কানে প্রত্যক্ষ ও প্রতিফলিত শব্দতরঙ্গ দুয়েরই আপতনে শব্দপ্রাবল্য বাড়তে থাকে। কিন্তু দেয়ালে ও ঘরের অন্যান্য আসবাবপত্রে শব্দের শোষণ এবং খোলা দরজা-জানালার পথে শব্দের বিলোপ ঘটতে থাকায় খুব শীঘ্রই বিকীরিত এবং অপচিত শক্তির মধ্যে সামঞ্জস্য আসে। ফলে, শ্রোতার কানে শব্দপ্রাবল্য একটা গড় স্থির মানে পৌঁছায় (A বিন্দু) এবং তারপর যতক্ষণ স্বনক বাজে ততক্ষণই প্রাবল্য অক্ষুণ্ণ থাকে। এই অবস্থায় স্বনক থামিয়ে দিলে (B বিন্দু) শব্দপ্রাবল্য দ্রুতহারে BC বরাবর কমতে থাকে; কমার কারণ, শক্তির প্রত্যক্ষ সরবরাহ বন্ধ আর প্রতিফলনে শোষণ-জনিত ক্রমশই শক্তিহানি। কথা বা গান ঘরের

চিত্র 19.1—স্বনকের ক্রিয়ায় ঘরে শব্দপ্রাবল্যের বৃদ্ধি ও হ্রাস

চিত্র 19.2—প্রতিফলনে শক্তিক্ষয়

সর্বত্র বোধগম্য হতে হলে, প্রতিটি শব্দ (১) যেকোন বিন্দুতেই যথেষ্ট শক্তিশালী হবে এবং (২) যথাযথ হারে ক্ষয় হয়ে পরের শব্দাংশের জন্য জায়গা ক'রে দেবে (চিত্র 19.2)। বাজনার বেলায় শব্দের ক্ষয়হার বিলম্বিত অর্থাৎ অনুরণন দীর্ঘায়িত হতে পারে।

কোন কক্ষের উপযুক্ত অনুরণন-কাল কক্ষের আয়তন এবং ব্যবহার উদ্দেশ্যে বিচার ক'রে স্থির করা হয়। স্টিফেন ও বেট এই সম্পর্কটি একটি প্রায়োগিক (empirical) সূত্রের আকারে প্রকাশ করেছেন—

চিত্র 19.3—কক্ষে প্রয়োজন-স্বীকৃত অনুরণন-কাল

$$T = n(0.0036\ V^{\frac{1}{3}} + 0.107)$$

এখানে ঘরের আয়তন V ঘনফুট এবং n-এর মান বক্তৃতা, বাজনা এবং সমবেত সঙ্গীতের (chorus) জন্য যথাক্রমে 4, 5 এবং 6 ধরতে হবে। 19.3 লেখচিত্রে ভিন্ন ভিন্ন উদ্দেশ্যে ব্যবহৃত ঘরের আয়তনের উপযুক্ত সর্বসম্মত অনুরণন-কাল দেখানো হয়েছে। অবশ্য শোষণ বদ্‌লে বদ্‌লে একই ঘরে তিন শ্রেণীর কাজই সুষ্ঠুভাবে চালানো যেতে পারে।

১৯-৫. অনুরণন-কাল: (১) স্যাবাইন-এর সূত্র:

১৯০০ সনে আমেরিকার হার্ভার্ড বিশ্ববিদ্যালয়ের অধ্যাপক স্যাবাইন প্রথম শ্রবণশালায় সুশ্রবণের সমস্যা নিয়ে ধারাবাহিকভাবে বিজ্ঞানসম্মত গবেষণা সুরু করেন। কোন ঘরে অনুরণন-কাল নির্ণয় করতে তিনি স্বনক হিসাবে 512 কম্পাংকের একটি অর্গান-পাইপ নেন; একটি হাওয়া-ভর্তি

আধার থেকে তাতে বায়ু-সরবরাহের ব্যবস্থা ছিল। একটি বিদ্যুৎ-চালিত ভাল্‌ভের সাহায্যে ইচ্ছামতো এতে বায়ুপ্রবাহ বন্ধ করা যেত। বন্ধ করার মুহূর্তটি একটি ঘূর্ণমান বেলনের ওপর বৈদ্যুতিক পন্থায় মুদ্রিত হ'ত এবং তার ওপরে একটি রেখা বরাবর কালান্তর-অংশাংকন করা থাকত। বায়ু-সরবরাহ বন্ধ হওয়ার মুহূর্তটি বিঘ্নিত হওয়ার পর শব্দের শ্রুতি-বহির্ভূত হওয়ার মুহূর্তটি, শ্রোতা ঐ রেখার ওপর চিহ্নিত করলে অনুরণন-কাল নির্দিষ্ট হয়। খোলা জানালাকে পূর্ণ শোষক ধরে নিয়ে ঘরে ভিন্ন ভিন্ন শোষক পদার্থ রেখে অনুরণন-কালের ওপর শোষণের প্রভাব স্থির করা হয়। তাঁর পরীক্ষায় পাওয়া গেল যে, অনুরণন-কাল T (১) ঘরের আয়তনের (V) সমানুপাতে এবং (২) ঘরের মোট শোষণের (A) ব্যস্তানুপাতে বদ্‌লায়, অর্থাৎ

$$T=KV/A \qquad (১৯-৫.১)$$

এখানে শোষণ $A=\Sigma\alpha_i S_i$; ঘরের যেকোন শোষক-তলের ক্ষেত্রফল S_i এবং α_i তার শোষণাংক (α_i কোন তলের শোষণ এবং সমান ক্ষেত্রফলের খোলা জানলায় যতখানি শোষণ হয়, তাদের অনুপাত)। মাপজোখ ফুটে নিলে ধ্রুবক K-র মান 0.05, আর মিটারে নিলে 0.16 হয়।

স্যাবাইন-সূত্রে অঙ্গীকার: তাঁর সংজ্ঞানুসারে, বন্ধ ঘরে শব্দের প্রাবল্য আদি মানের দশ লক্ষ ভাগের এক ভাগে পৌঁছতে যত সময় লাগে, তাই হচ্ছে সেই ঘরের অনুরণন-কাল। অনুরণন-কালের সূত্র (১৯-৫.১) প্রতিষ্ঠা করতে স্যাবাইন যে পন্থায় এগিয়েছিলেন, তাতে নিম্নলিখিত অঙ্গীকারগুলি প্রত্যক্ষে বা পরোক্ষে ছিল—

(১) স্বনক থেকে নিয়মিত হারে শব্দ উৎপন্ন হয় এবং সেই হার ঘরে পূর্বপ্রতিষ্ঠিত শক্তি-ঘনত্বের দ্বারা প্রভাবিত নয়।

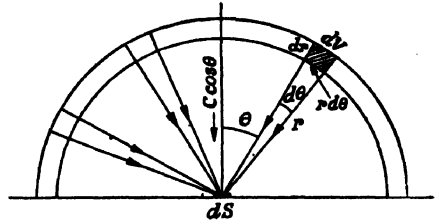
(২) ঘরের সব দিকেই শক্তি-বিকিরণ সুষমহারে হয় এবং সর্বত্রই শক্তি-বণ্টনও সুষম থাকে।

(৩) ঘরের কোন বিন্দুতেই শব্দের ব্যতিচার ঘটে না।

(৪) বায়ু শব্দ শোষণ করে না। আপতন-তলে শব্দের শোষণ এবং খোলা জানলা-পথে বহির্গমনের দরুন শক্তিক্ষয় হয় এবং এই ক্ষয় নিরবচ্ছিন্নভাবেই হতে থাকে।

(৫) কোন তলে শোষণাংক আপতিত শব্দের কম্পাংক-নিরপেক্ষ।

পরে বিস্তারিত আলোচনা থেকে স্টাট্ দেখিয়েছেন যে, যদি ঘরের মাপ ব্যবহৃত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক বড় হয়, তবেই স্যাবাইন-সূত্র প্রযোজ্য ; সেক্ষেত্রে ঘরের নিজস্ব অনুনাদী কম্পাংক স্বনক-কম্পাংকের থেকে অনেক কম। এইক্ষেত্রে ঘরকে বড় বলা হবে। সুতরাং স্যাবাইন-নির্ধারিত অনুরণন-কালের সংজ্ঞা বিস্তৃত কক্ষের বেলায় প্রযোজ্য এবং কক্ষের আকার ও স্বনকের অবস্থান-নিরপেক্ষ। তখন শক্তির সুষম বণ্টন হওয়ার দরকার হয় না।

স্যাবাইন-সূত্রের তাত্ত্বিক প্রতিষ্ঠা ঃ ওপরের অঙ্গীকারগুলির ভিত্তিতে দেয়ালের একক ক্ষেত্রতলে আপতিত শক্তির পরিমাণ নির্ণয় করা সম্ভব। ধরা যাক, শক্তি সমহারে চারিদিকে ছড়াচ্ছে এবং সর্বত্রই একক আয়তনে E পরিমাণের শক্তি রয়েছে। তাহলে $d\omega$ ঘন-কোণে বিকিরিত শক্তির মান $E.(d\omega/4\pi)$ হবে (কারণ কোন ক্ষুদ্র আয়তনের ওপর মোট ঘনকোণের মাপ সর্বদাই 4π)। শব্দ যদি c বেগে চলে এবং দেয়ালের কোন বিন্দুতে θ কোণে পড়ে, তবে বেগের কার্যকর উপাংশ দাঁড়ায় $c \cos\theta$, আর একক ক্ষেত্রে এক সেকেণ্ডে আপতিত শক্তির মান $Ec \cos\theta \times d\omega/4\pi$ হয়। এখন, এই একক ক্ষেত্রে আপতিত শক্তির সবটাই তার মধ্যবিন্দুকে কেন্দ্র ক'রে বর্ণিত অর্ধগোলক থেকে [চিত্র 19.4(a)] আসবে ব'লে ধরা যায় ; আর সেই শক্তির পরিমাণ হবে

চিত্র 19.4(a)—ক্ষুদ্র তলাংশে শব্দ-শক্তির আপতন

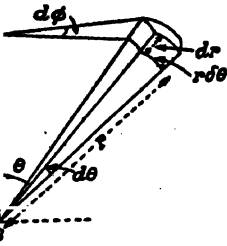
$$\frac{cE}{4\pi}\int d\omega \cos\theta = \frac{cE}{4\pi}\int_0^{\pi/2} d\,[2\pi(1-\cos\theta)].\cos\theta$$

$$= \frac{cE}{2}\int_0^{\pi/2} -d\,(\cos\theta)\cos\theta$$

$$= \frac{Ec}{2}\int_{\pi/2}^{0} \cos\theta.\, d(\cos\theta)$$

$$= \frac{Ec}{4}\Big(\cos\theta\Big)_{\pi/2}^{0} = \frac{Ec}{4} \qquad (১৯\text{-}৫.২)$$

[**বিকল্প ব্যুৎপত্তি ঃ** ধরা যাক, দেয়ালে ds ক্ষুদ্র তলের ওপরে লম্বের

সঙ্গে θ এবং $\theta+d\theta$ শংকুকোণের মধ্যে দিয়ে শক্তি এসে পড়ছে [চিত্র 19.4(b)] এবং তার আয়তন-ঘনত্ব E হোক। তাহলে এখন ds থেকে r দূরত্বে

$$rd\theta\times dr\times r\sin\theta.d\phi$$

মাপের একটি আয়তনাংশ δV নেওয়া যাক। তাহলে ds তলে আপতিত শাব্দ-শক্তি

$$\delta W=E\delta V.\delta\omega/4\pi$$

চিত্র 19.4(b)—আপতিত শাব্দ-শক্তির ঘনত্ব

মানের হবে। δV এখানে ds-এ যে ঘনকোণ উৎপন্ন করছে, তার মান হচ্ছে $\delta\omega$; তাহলে

$$\delta W=\frac{E\times rd\theta.dr.r\sin\theta\, d\phi\times ds\cos\theta}{4\pi.r^2}$$

$$=\frac{E.ds}{4\pi}\sin\theta.\cos\theta.d\theta.dr.d\phi$$

$$=\frac{E.ds}{4\pi}\cdot\sin\theta.d(\sin\theta).dr.d\phi$$

এখন আগের মতোই ds তলাংশের উপর আপতিত শাব্দ-শক্তি, তারই মধ্যবিন্দু-কেন্দ্রিক অর্ধগোলক থেকে আসবে। সেই শক্তির মান হবে

$$W=\frac{E.ds}{4\pi}\int_0^c dr\int_0^{\pi/2}\sin\theta.\ d(\sin\theta)\int^{2\pi}d\phi$$

$$\frac{E.ds}{4\pi}\cdot\left(\tfrac{1}{2}\sin^2\theta\right)_0^{\pi/2}\cdot 2\pi$$

$$=\tfrac{1}{4}Ec.ds$$

$$=\tfrac{1}{4}Ec.\,ds$$

এখানে c শব্দবেগ; এক সেকেণ্ডে যতখানি শক্তি এসে পড়বে স্বভাবতই তা থাকবে c ব্যাসার্ধের অর্ধগোলকের মধ্যে। তাহলে একক ক্ষেত্রে আপতিত শক্তির মান $\frac{1}{4}Ec$ দাঁড়াবে।]

সুতরাং শব্দপ্রাবল্য বা একক ক্ষেত্রে আপতিত তথা শোষিত শক্তির মান, $I=\frac{1}{4}cE$ হবে। কক্ষের ds ক্ষেত্রতলের শোষণাংক α হলে, শোষণ $\alpha.ds$ এবং মোট শোষণ $A=\Sigma\alpha.ds$ হবে; সুতরাং ঘরে প্রতি সেকেণ্ডে মোট শোষিত শক্তির মান দাঁড়াবে

$$\tfrac{1}{4}Ec\,\Sigma\alpha.ds=EcA/4=IA$$

ঘরের আয়তন V হলে, যেকোন মুহূর্তে মোট শক্তির মান EV এবং সময়-সাপেক্ষে তার বৃদ্ধিহার $\frac{\partial}{\partial t}(EV)=V\frac{\partial E}{\partial t}$, কারণ ঘরের আয়তন স্থির। আবার স্বনক থেকে শক্তি-উৎসারণের হার যদি E' হয়, তাহলে IA শক্তি-শোষণের হার হওয়ায়, ঘরে শক্তি-বৃদ্ধির সময়হার হবে $E'-IA$; তাহলে

$$V\frac{\partial E}{\partial t}=E'-IA \text{ বা } V\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{4I}{c}\right)=E'-IA \qquad (\text{১৯-৫.৩})$$

$$\text{বা } \frac{4V}{c}\cdot\frac{dI}{dt}=E'-IA \text{ বা } \frac{dI}{E'-IA}=\frac{c}{4V}dt$$

$$\text{বা } \frac{-d(E'-IA)}{A(E'-IA)}=\frac{c}{4V}dt,$$ সমাকলন ক'রে পাব

$$\ln\ (E'-IA)=-\frac{Ac}{4V}t+k$$

স্বনক যে মুহূর্তে বাজতে সুরু ক'রলো, অর্থাৎ $t=0$ নিমেষে শব্দপ্রাবল্য নিশ্চয়ই শূন্য ; তাহলে $k=\ln E'$

$$\therefore\quad \ln\frac{E'-IA}{E'}=-\frac{Act}{4V} \text{ বা } 1-\frac{IA}{E'}=e^{-Act/4V}$$

$$\therefore\quad I=\frac{E'}{A}(1-e^{-Act/4V}) \qquad (\text{১৯-৫.৪})$$

এই সমীকরণ, স্বনক বাজা-কালে বন্ধ ঘরে শক্তিবৃদ্ধির সময়হার নির্দেশ করে। দেখা যাচ্ছে, চরম প্রাবল্য $I_0=E'/A$; স্বনক বাজতে থাকলে ঘরে প্রাবল্য এই মানে স্থির থাকার কথা। সুতরাং লেখা যেতে পারে, কোন নিমেষে শক্তি-প্রাবল্য

$$I=I_0\ (1-e^{-Act/4V})$$

এখন স্বনক থামিয়ে দিলে, $E'=0$ হবে। তাহলে ১৯-৫.৩ অবকল সমীকরণ থেকে

$$V\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{4I}{c}\right)=-IA \text{ বা } \frac{dI}{I}=-\frac{Ac}{4V}dt \qquad (\text{১৯-৫.৫})$$

অবকলন ক'রে আসবে, $\ln I=-\frac{Act}{4V}+k'$

এখন, $t=0$ মুহূর্তে, $I=I_0$, অর্থাৎ $k=\ln I_0$

$$\therefore \quad \ln I/I_0 = -\frac{Act}{4V} \quad \therefore \quad I = I_0\, e^{-Act/4V} \qquad (১৯\text{-}৫.৬)$$

এই সমীকরণে সূচক $(cA/4V)\,t$ থেকে অনুরণন-কাল T পাওয়া সম্ভব, কেননা সংজ্ঞানুযায়ী, $I_0/I = 10^6$ এবং সমীকরণ থেকে

$$I_0/I = e^{\frac{cA}{4V}T} = e^{KT} = 10^6$$

$$\therefore \quad KT = 6\ln 10 = 6\times 2.303\times \log 10 = 6\times 2.303\times 1$$

$$\therefore T = \frac{1}{K}\ln\frac{I_0}{I} = \frac{1}{K}\,2.303\times 6$$

$$= \frac{6\times 2.303\times 4V}{cA} = \frac{24\times 2.303\times V}{1100\text{ft/s}\times A}$$

$$\simeq \frac{0.05V}{A} \qquad (১৯\text{-}৫.৭)$$

১৯-৫.১ সমীকরণে স্যাবাইন-এর পরীক্ষণ-লব্ধ ফলের সঙ্গে এই ফল অভিন্ন। সুতরাং স্যাবাইন-এর অঙ্গীকারগুলি যুক্তিনিষ্ঠ এবং তথ্যসম্মত ব'লে ধরা যায়।

উদাহরণ ঃ (১) $40\times 100\times 20$ ফিট মাপের হল্‌ঘরে (ক) 7500 বর্গফুট চুনকাম $(\alpha_1 = 0.03)$ করা, (খ) 6000 বর্গফুট কাঠের আস্তরণ $(\alpha_2 = 0.06)$ দেওয়া, (গ) 400 বর্গফুট কাচের $(\alpha_3 = 0.025)$ ব্যবস্থা সমেত (ঘ) 600টি আসন $(\alpha_4 = 0.3)$ এবং (ঙ) 500 জন শ্রোতা ($\alpha_5 =$ প্রতি জনে 4.3) থাকলে, অনুরণন-কাল কত হবে? শ্রোতা একজনও না থাকলেই বা কত হবে?

উত্তর ঃ এখানে শোষণ,

$$A = \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \alpha_4 s_4 + \alpha_5 s_5$$

$$= 7500\times 0.03 + 6000\times 0.06 + 400\times 0.025$$

$$+ 600\times 0.3 + 500\times(4.3 - 0.3)$$

[কারণ এই আসনগুলি তখন ভর্তি]

$= 2775$ স্যাবিন

$$\therefore \quad T_1 = \frac{0.05 \times 40 \times 100 \times 20}{2775} = 1.44 \text{ সে}$$

আবার শ্রোতা না থাকলে, তাদের দরুন শোষণ (অর্থাৎ 2000 স্যাবিন) হবে না। তাই শূন্য হলঘরে অনুরণন-কাল দাঁড়াবে

$$T_2 = \frac{0.05 \times 40 \times 100 \times 20}{775} = 5.16 \text{ সে}$$

(২) একটি বেতার-সম্প্রচার স্টুডিওর মাপ 70×40×25 ঘন ফিট এবং খালি থাকলে অনুরণন-কাল 0.90 সে হয়। 250 জন উপস্থিত থাকলে অনুরণন-কাল কত হবে ?

উত্তর ঃ প্রথম ক্ষেত্রে ঘরের মোট শোষণ

$$A_1 = \frac{0.05 \times 70 \times 40 \times 26}{0.90} = 3888 \text{ স্যাবিন}$$

জনপূর্ণ কক্ষে শোষণ $A_2 = 3888 + 250 \times 4.3 = 4963$ স্যাবিন

∴ জনপূর্ণ কক্ষে অনুরণন-কাল

$$T = \frac{0.05 \times 70 \times 40 \times 25}{4963} = 0.70 \text{ সে}$$

স্যাব্যাইন-সূত্রের সমালোচনা ঃ তত্ত্ব ও পরীক্ষালব্ধ ফলের মধ্যে মোটামুটিভাবে সঙ্গতি থাকলেও, স্যাবাইন-সূত্রে ফল এবং অঙ্গীকারে কয়েকটি ত্রুটি থেকে গেছে ; যথা—

(১) সূত্রমতে, ঘরে পূর্ণ শোষণ হলে, $A = 1$ এবং $T = 0.05V$ সে হবে। এটা অসম্ভব, কারণ তখন অনুরণন হতেই পারে না।

(২) পরীক্ষা-নিরীক্ষা চালিয়ে দেখা গেছে যে, $A > 0.2$ হলেই স্যাবাইন-সূত্রে ত্রুটি আসে।

(৩) স্যাবাইন-এর মতে, সাম্য অবস্থায় শক্তিক্ষয় বা শোষণ নিরবচ্ছিন্ন অথচ বায়ুতে শব্দ-শোষণ হবে না। ব্যাপারটা অসম্ভব ; কেননা তাহলে শোষণ কেবলমাত্র প্রতিফলনের সময়েই হবে, অর্থাৎ শোষণ অসন্তত।

(৪) স্যাবাইন ধরে নিয়েছিলেন যে, সাম্য অবস্থায় ঘরে শক্তির সুষম বণ্টন থাকবে। কিন্তু সাম্য অবস্থায় ঘরে স্থাণুতরঙ্গের প্রতিষ্ঠা হবে ; সেক্ষেত্রে শক্তির সুষম বণ্টন সম্ভব নয়।

(৫) তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় ঘরের মাপ অনেক বড় হলে এবং শোষণ কম হলেই স্যাবাইন-সূত্রে সঠিক ফল মেলে ; নচেৎ নয়।

(২) **অনুরণন-কালের Eyring-এর সূত্র :** উপরোক্ত সমালোচনাবলীর দ্বিতীয় এবং তৃতীয় আপত্তিটি উপস্থাপিত করেন এই বৈজ্ঞানিক। তিনি বলেন যে, শোষণ হয় কেবলমাত্র প্রতিফলনের সময়, সুতরাং তা নিরবচ্ছিন্ন নয়। প্রতিফলনের ফল স্বনকের অলীক বিম্বসৃষ্ট, এই চিত্রের ভিত্তিতে তিনি অনুরণন-কালের বিকল্প ব্যঞ্জনা উপস্থাপিত করেন। সেটি হ'ল

$$T = \frac{0.05V}{-s\ln(1-\alpha)} \qquad (১৯\text{-}৫.৮)$$

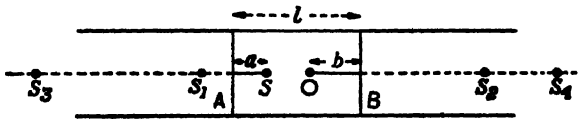
এখানে ঘরের মোট তলক্ষেত্র s এবং তার গড় শোষণাংক $\alpha = \Sigma\alpha_n s_n / s_n$; এই সমষ্টিকরণে ঘরের প্রতিটি তল s_n ও শোষণাংক (α_n) অন্তর্ভুক্ত। এখন

$$\ln(1-\alpha) = -(\alpha + \tfrac{1}{2}\alpha^2 + \tfrac{1}{3}\alpha^3 + \cdots)$$

যদি α খুব ছোট হয়, তাহলেই $\ln(1-\alpha) \to -\alpha$ হয় এবং আমরা স্যাবাইন-সূত্রে পৌঁছই। দুই সূত্রের ব্যুৎপত্তি-প্রকরণ এবং চেহারায় যথেষ্ট প্রভেদ থাকলেও, দেখা যাচ্ছে যে, স্যাবাইন-সূত্র ইরিং-সূত্রেরই এক বিশেষ রূপ—শোষণ কম হলে দুই সূত্র সমরূপ। $\alpha = 1$ হলে, অর্থাৎ শোষণ সম্পূর্ণ হলে, ইরিং-সূত্রে $T = 0$ হবে—যা বাস্তবে হওয়ার কথা—স্যাবাইন-সূত্রে তা আমরা পাইনি।

ইরিং-সূত্রের সরলীকৃত প্রতিষ্ঠা : সমান্তরাল দুটি আয়নায় কোন আলোকপ্রভবের পৌনঃপুনিক প্রতিফলনে যেমন দু'-সারি বিম্ব উৎপন্ন হয়, সাধারণ ঘরের দুই সমান্তরাল দেয়ালে শব্দের প্রতিফলনে তেমনি স্বনকের দু'-সারি অলীক শাব্দ-প্রতিবিম্ব উৎপন্ন হয়। ইরিং-সূত্র প্রতিষ্ঠা করতে আমরা এইরকম একটা সরলীকৃত চিত্র কল্পনা করতে পারি।

19.5 চিত্রে একটি ঘরের দুই প্রান্তের দেয়াল A ও B আংশিক শোষক উপাদানে ঢাকা এবং পাশের দেয়ালগুলি পূর্ণ প্রতিফলক ব'লে ধরা হয়েছে। ঘরের দৈর্ঘ্য l, A দেয়াল থেকে স্বনকের (S) দূরত্ব a এবং B দেয়াল থেকে শ্রোতার (O) দূরত্ব b ধরা যাক। শব্দ শুরু হওয়ার $(l-a-b)/c$ সেকেণ্ড পরে স্বনক থেকে শব্দ প্রথম সরাসরি শ্রোতার কাছে I প্রাবল্যে পৌঁছবে। শ্রোতা দ্বিতীয়বার শব্দ শুনবে B প্রান্তে প্রতিফলনের পর, অর্থাৎ $(l-a+b)/c$

সেকেণ্ড পরে ; এই শব্দের উৎস অলীক বিম্ব S_2 ধরা যায়। এই দুই শব্দ O-তে পৌঁছনোর অন্তর্বর্তী কালে O-তে শব্দপ্রাবল্য I মানে অক্ষুণ্ণ থাকছে। কিন্তু দ্বিতীয় শব্দ O-তে পৌঁছনোমাত্র সেখানে শব্দপ্রাবল্য হঠাৎ বেড়ে যাবে, বৃদ্ধির মান $I(1-\alpha)$; O-তে তৃতীয় শব্দ আসবে A দেয়ালে প্রথম প্রতিফলনের পর (অর্থাৎ অলীক বিম্ব S_1 থেকে)। সে, সুরুর $(l+a-b)/c$

চিত্র 19.5—পৌনঃপুনিক শাব্দপ্রতিফলন

সেকেণ্ড পরে O-তে $I(1-\alpha)$ প্রাবল্য যোগ করবে। কাজেই এই অবস্থায় মোট প্রাবল্য $I+2I(1-\alpha)$ হবে। তার পর দ্বিতীয় প্রতিফলনের দরুন অলীক প্রতিবিম্বগুলি ধরা যাক ; B থেকে প্রতিফলিত শব্দ আবার A থেকে প্রতিফলিত হলে, ধরা যায়, S_2 হবে স্বনক আর S_3 তার প্রতিবিম্ব ; অনুরূপে A-তে প্রতিফলিত শব্দ B-তে পৌঁছলে, S_1-কে স্বনক আর S_4-কে তার বিম্ব ধরা চলে। এদের দুয়েরই দরুন যুক্ত শব্দপ্রাবল্য $2I(1-\alpha)^2$ হবে। পরবর্তী ক্রমের বিম্বগুলির দূরত্ব বেশী, সুতরাং তারা দুর্বলতর। O-তে মোট শব্দশক্তি স্বনকের ও তার বিভিন্ন ক্রমের প্রতিবিম্বের অবদানের সমষ্টি।

স্বনক থেমে গেলে প্রত্যক্ষ ও পরোক্ষ শক্তির উৎসগুলিও একযোগে থেমে যাবে। কিন্তু শব্দতরঙ্গগুলি O-তে তারপরেও আসতে থাকবে, প্রতিবিম্বগুলি দূরত্ব সাপেক্ষে এক এক ক'রে বাদ পড়ে যেতে থাকবে। যেকোন বিন্দুতে স্বনক কল্পনা ক'রে মোটামুটি এই ভিত্তিতে ইরিং শক্তি-ঘনত্বের এবং শক্তি-অবক্ষয়ের মান হিসেবে পেয়েছেন

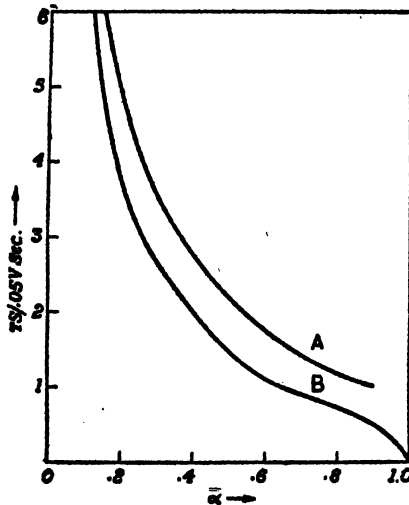
$$E=\frac{4I}{-c\ln(1-\alpha)}\left[1-\exp\frac{cs\ln(1-\alpha)}{4V}t\right]$$

$$\text{এবং}\quad E=E_0\exp\left[\frac{cs\ln(1-\alpha)}{4V}t\right] \qquad (১৯-৫.৯)$$

স্যাবাইন-এর বিশ্লেষণে পূর্ণ শোষণ A-র মান $-s\ln(1-\alpha)$ বসালে, এই সূত্র আসে। α ছোট হলে, দ্বিতীয় রাশিটি A-র সমান হয়।

(৩) মিলিংটন ও সেটি ইরিং-সূত্রের আরও সংশোধন করেছেন। তাঁরা গড় শোষণাংক α এবং মোট তলক্ষেত্র S-এর বদলে একটি তল s_i এবং তার শোষণাংক α_i ধ'রে, সমষ্টিগতভাবে তলক্ষেত্র ও শোষণাংক বিবেচনা করেছেন। তাঁদের সূত্রে পাওয়া যাচ্ছে

$$T = \frac{0.05V}{\sum -s_i \ln(1-\alpha_i)} \qquad (১৯\text{-}৫.১০)$$

তুলনামূলক আলোচনা: স্যাবাইন ও ইরিং সূত্রের তুলনা আগেই করা হয়েছে। 19.6 চিত্রে গড় শোষণাংক (α) এবং অনুরণন-কালের মধ্যে সম্পর্ক দুই সূত্রানুযায়ী কি দাঁড়ায় তা দেখা যাচ্ছে।

চিত্র 19.6—স্যাবাইন ও ইরিং সূত্রের তুলনা

মিলিংটন-সূত্রে $-\ln(1-\alpha_i)$-কে কার্যকর শোষণাংক (α_e) ধরলে, স্যাবাইন-এর সূত্র এসে যায়। পরীক্ষায় দেখা গেল, যেসব শোষক উপাদানে $\alpha_i > 0.63$ হয়, তাদের বেলায় $\alpha_e > 1$ আসে। এ থেকে এই সিদ্ধান্ত করা যায় যে, স্যাবাইন-সূত্রে অনুরণন-কালের ওপর উচ্চ শোষণাংকের যতখানি প্রভাব হবার কথা, মিলিংটন-সূত্রে তার চেয়ে প্রভাব বেশী ব'লেই নির্দেশিত।

বাস্তবে দেখা গেছে যে, ঘরে বিভিন্ন রকমের শোষক পদার্থ থাকলে, মিলিংটন-সূত্র থেকে পাওয়া অনুরণন-কালের মান পরীক্ষালব্ধ মানের সবচেয়ে

কাছাকাছি হয়। α-এর মান 0.2-এর কম হলে, স্যাবাইন-সূত্র কার্যকর ; তার বেশী হলে, ইরিং-সূত্র প্রযোজ্য কিন্তু মিলিংটন-সূত্র সর্বত্রই কাজ দেয়।

শোষণ (A) কম হলে, অনুরণন-কাল (T) তুলনায় দীর্ঘ, কারণ শব্দক্ষয় বিলম্বিত ; সেইরকম ঘর 'প্রাণবন্ত' এবং সেখানে স্যাবাইন-সূত্র প্রযোজ্য। A বাড়লে শব্দক্ষয় দ্রুততর, কাজেই T কম। T অনেক কম হলে, ঘর 'নিষ্প্রাণ' হয়ে পড়ে এবং তখন সুষম শক্তি-বণ্টন সম্ভব নয়। সেক্ষেত্রে অনুরণনের অভাবে বক্তার কণ্ঠস্বর যথাযথ প্রাবল্যে ঘরের সর্বত্র পৌঁছে দেওয়া দুঃসাধ্য হয়ে পড়ে ; ইরিং ও মিলিংটন-এর সূত্র এইজাতীয় ঘরেও প্রযোজ্য।

(৪) **স্থাণুতরঙ্গ-বিচারে অনুরণন-কাল** : ওপরের বিশ্লেষণগুলি শব্দের রশ্মিধর্মের ভিত্তিতে করা হয়েছে। কিন্তু আমরা জানি যে, আলোর ক্ষেত্রে তরঙ্গধর্মের ভিত্তিতে কোন ঘটনার বিশ্লেষণ, তার রশ্মিতাত্ত্বিক বিশ্লেষণের তুলনায় বেশী বাস্তবানুগ এবং নির্ভুল। আলোর তুলনায় শব্দের তরঙ্গ অনেক দীর্ঘ, সুতরাং তার তরঙ্গধর্মের প্রকাশ অনেক বেশী। তাই দেখা গেছে যে, তরঙ্গধর্মের ভিত্তিতে অনুরণন আলোচনা করলে, তার সূক্ষ্মতর এবং বাস্তবসম্মত বিবরণ মেলে।

আকারনির্বিশেষে যেকোন ঘরেরই বায়ুস্তম্ভের মতো স্বকীয় স্পন্দনরীতি এবং অনুনাদী কম্পাংক আছে। তবে সরল জ্যামিতিক আকারের ঘরেই তাদের গণনা সম্ভব ; যেমন—ঘরের দৈর্ঘ্য, প্রস্থ, উচ্চতা যথাক্রমে l, b, এবং h হলে, তার স্বকীয় কম্পাংক হবে

$$n = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{m_1}{l}\right)^2 + \left(\frac{m_2}{b}\right)^2 + \left(\frac{m_3}{h}\right)^2} \qquad (১৯\text{-}৫.১১)$$

এখানে c শব্দের বেগ আর m_1, m_2 এবং m_3 তিনটি অখণ্ড সংখ্যা। দুটি m-মান শূন্য হলে তরঙ্গ-গতি তৃতীয় অক্ষের সমান্তরাল ; সেই তরঙ্গকে অক্ষীয় তরঙ্গ বলে। যদি একটি m-মান শূন্য হয়, তাহলে তরঙ্গের গতি কক্ষের কোন এক তলের সমান্তরাল, আর কোনটাই শূন্য না হলে, তরঙ্গ অনৃজু (oblique) এবং দেয়ালে তির্যক্‌ভাবে পড়বে।

যেকোন ঘরেরই একাধিক স্পন্দনাংক থাকে। ঘরে স্বনক বাজতে সুরু করার সামান্য পরেই স্থায়ী পরবশ স্পন্দনের প্রতিষ্ঠা হয়। এই নিয়মিত স্পন্দন ঘরের বিভিন্ন স্পন্দনরীতির সমাপতনে উৎপন্ন ব'লে গণ্য করা যায়। সুতরাং স্বনক থেমে গেলে, ঘরের মোট শাব্দশক্তি এইসব স্থাণুস্পন্দনে সংহত

থাকে। এইসব স্থাণুস্পন্দনের কম্পাংকগুলি স্বনক-কম্পাংকের কাছাকাছিই থাকে। ক্ষয়কালে এই তরঙ্গগুলির মধ্যে স্বরকম্প হয়—অনুরণন তারই ফলশ্রুতি। স্বনকের বহু স্পন্দনাংক থাকলে, শব্দ-অবক্ষয়-কালে আরও অনেকগুলি পরবশ স্পন্দনের উৎপত্তি হয়। কিন্তু স্পন্দন আবার সরাসরিই অনুনাদ ঘটায়—তখন এই স্পন্দনরীতিগুলিতেই বেশী পরিমাণ শক্তি সংহত হয়।

তরঙ্গের ক্ষয়হার শাব্দবাধ-নির্ভর। তাই অনুনাদে তার মান অল্প। কাজেই সব-ক'টি স্পন্দনরীতির ক্ষয় একই হারে হবে না। দ্রুতহারে ক্ষয় হলে অনুরণন-কাল সংক্ষিপ্ত আর ধীর ক্ষয়ে দীর্ঘায়িত—এই ভিত্তিতে বিশ্লেষণ করলে অনুরণনের কাল দাঁড়ায়

$$T = \frac{0.05V}{(E_m)_l A_l + (E_m)_b A_b + (E_m)_h A_h} \qquad (১৯\text{-}৫.১২)$$

এখানে A_l A_b এবং A_h যথাক্রমে l, b এবং h অক্ষের লম্ব দেয়ালগুলিতে মোট শোষণ। আর $m=0$ হলে, $E_m=\frac{1}{2}$ এবং $m>0$ হলে, $E_m=1$; যদি আপতন বাঁকা বা ন-ঋজু (0) হয়, তাহলে $m>0$, $E_m=1$ এবং T স্যাবাইন-সূত্রানুযায়ী হয়। কিন্তু আপতিত তরঙ্গ অক্ষীয় (a) হলে বা স্পর্শক (t) বরাবর চললে ($E_m=0.5$) অনুরণন-কাল দীর্ঘতর হয়। প্রতিটি দেয়ালে শোষণ সমান হলে, তিন অনুরণন-কালের অনুপাত দাঁড়ায়

$$T_a : T_t : T_o = 6 : 5 : 4 \qquad (১৯\text{-}৫.১৩)$$

১৯-৬. অনুরণন-কাল নির্ণয়:

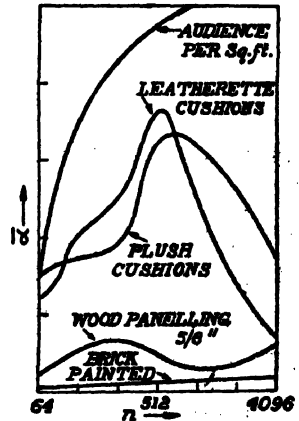
সংজ্ঞানুসারে, কোন স্বনক থামার পর শব্দপ্রাবল্য 60 ডেসিবেল নেমে যেতে যে সময় লাগে, তাকেই অনুরণন-কাল বলে। স্যাবাইন কি-ভাবে এই সময় মেপেছিলেন তা আমরা দেখেছি।

বর্তমানে স্বনক হিসাবে লাউড-স্পীকার-যুক্ত এক শ্রাব্যকম্পাংক (audio-frequency) ভাল্‌ভ্‌-স্পন্দক ব্যবহার করা হয়। প্রতিফলন ও শোষণের ফলে বিক্ষিপ্ত (diffuse) ও সমানিত প্রাবল্য, এক মাইক্রোফোনে মাপা হয়। মাইক্রোফোন একটি সম্প্রসারক মারফৎ ভাল্‌ভ্‌-ভোল্টমিটারের সঙ্গে যুক্ত। ভাল্‌ভ্‌-ভোল্টমিটারের সূচকের সঙ্গে একটি লেখনী যুক্ত; সে সমবেগে সচল এক অংশাংকিত চার্টে পাঠ দ্রুত মুদ্রিত ক'রে যায়। সময়ের সঙ্গে প্রাবল্যক্ষয় এই লিখন থেকে পাওয়া যায়। সুতরাং কতটা কালান্তরে প্রাবল্য আদি মান থেকে 60 ডেসিবেল নামে, এই লিখন তা নির্দেশ করে। সম্প্রসারকটি যদি

লগারিদ্‌মীয় শ্রেণীর হয়, তাহলে প্রাবল্যের সূচকীয় অবক্ষয়, লিখনটিতে সরলরেখায় লিপিবদ্ধ হয়। সেই রেখার নতি থেকে অনুরণন-কাল বার করা যায়।

অবশ্য স্বনক হিসাবে পিস্তলের ফাঁকা নির্ঘোষ ব্যবহার করা সঙ্গততর ; এই ক্ষণশব্দে শ্রবণপাল্লার সব কম্পাংকই উপস্থিত। এখানে শব্দ হঠাৎ থামে এবং থামার মুহূর্তটি এক চৌম্বক-রিবনে মুদ্রিত হয়। মাইক্রোফোনের সম্প্রসারকে একটি সংকীর্ণ কম্পাংকপাল্লার ফিল্টার-বর্তনী যুক্ত থাকে। এই বর্তনীর মধ্যে দিয়ে পছন্দমতো অতি সংকীর্ণ কম্পাংক-পটি (band) ছেঁকে বার ক'রে এনে, তার অনুরণন-কাল নির্ণয় করা যায়। ভিন্ন ভিন্ন কম্পাংক-পটির অনুরণন-কাল একে একে বার করা সম্ভব। নির্ণীত কালগুলি কম্পাংক-নির্ভর হবে, কেননা যেকোন উপাদানের শোষণও কম্পাংক-নির্ভর।

১৯-৬. শোষণাংক এবং তার পরীক্ষামূলক নির্ণয় :

অনুরণনের সঙ্গে শোষণের অঙ্গাঙ্গী সম্পর্ক। শোষণে শব্দশক্তির শেষ পর্যন্ত তাপে রূপান্তর ঘটে। মাধ্যমের সচ্ছিদ্রতা এবং নমনীয়তা, শব্দশোষণের দুই কারণ। সচ্ছিদ্র মাধ্যমের ফাঁকের মধ্যে শব্দতরঙ্গ ঢুকে নিবিড় ঘর্ষণে তাপে পরিণত হয়, আর তন্তুগুলিকে স্পন্দিত করতেও শক্তিক্ষয় করে। উপাদান নরম হলে শব্দতরঙ্গ যে স্পন্দন সৃষ্টি করে তা অবদমনের ফলে শেষ পর্যন্ত ক্ষয় হয়ে তাপে পরিণত হয়। ফেল্ট, কম্বল, কার্পেট প্রভৃতির তন্তুগুলির আলগা বিন্যাস তথা সচ্ছিদ্রতাই তাদের উচ্চ শোষণাংকের কারণ। পালিশ-করা দেয়ালে শোষণাংক কম হয়, কেননা তাতে ছিদ্রগুলি অতি সূক্ষ্ম।

চিত্র 19.7—বিভিন্ন মাধ্যমের শব্দ-শোষণাংক

কোন পদার্থের শোষণাংক (ক) উপাদান ও বেধ—(খ) শব্দতরঙ্গের আপতন-কোণ এবং (গ) কম্পাংকের ওপর নির্ভর করে। 19.7 চিত্রে ভিন্ন ভিন্ন জিনিসের শোষণাংকের কম্পাংক-নির্ভরতা চিত্রিত হয়েছে। দেখা যাচ্ছে, এই নির্ভরতা নির্দিষ্ট কোন ধারা মেনে চলে না,—বৈচিত্র্যময়। রুদ্ধ কক্ষে সঙ্গীতানুষ্ঠানে, শোষণের কম্পাংক-নির্ভরতা অতি গুরুত্বপূর্ণ এবং বিশেষ নজরসাপেক্ষ বিষয়। শোষক পদার্থ ছাড়াই, উচ্চ কম্পাংকে এবং জলীয় বাষ্পের উপস্থিতিতে বায়ু শক্তিশালী শোষক হয়ে দাঁড়ায়।

শোষণাংক-নির্ণয় : এই উদ্দেশ্যে দুটি পন্থা ব্যবহার হয়—অনুরণন-কক্ষ আর স্থাণুতরঙ্গ পদ্ধতি। প্রথম পদ্ধতিতে অনেকখানি জিনিস লাগে, দ্বিতীয় পন্থায় সামান্যই।

খোলা জানলায় আপতিত শব্দশক্তি নিঃশেষে আত্মসাৎ হয় ব'লে, স্যাবাইন, তার শোষণকে একক ধ'রে নিয়ে কোন পদার্থের মোট শোষণ এবং সমক্ষেত্র জানলার মোট শোষণ এই দুয়ের অনুপাতকে ঐ পদার্থের শোষণাংক বলেন; স্পষ্টতই যেকোন পদার্থের শোষণাংক প্রকৃত ভগ্নাংশ হবে। শোষণাংকের একক **স্যাবিন**—এক বর্গফুট পরিমিত খোলা জানলা কর্তৃক শোষিত শব্দশক্তি; অর্থাৎ ফেল্টের শোষণাংক 0.7 স্যাবিন বলতে বোঝায় এক বর্গফুট ফেল্ট, 0.7 বর্গফুট খোলা জানলার সমান শব্দশক্তি শোষণ করে। তাহলে কোন পদার্থের শোষণ স্যাবিনে প্রকাশ করার অর্থ, তার বর্গফুটে ক্ষেত্রফল এবং শোষণাংকের গুণফল (αs) এবং তখনও একক বর্গফুটই। সুতরাং কোন ঘরের মোট শোষণ তার ভেতরে সমস্ত জিনিসপত্র ও তলগুলির প্রত্যেকের শোষণের সমষ্টি অর্থাৎ বর্গফুটে মোট শোষণ হয়

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \cdots = \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \cdots = \sum \alpha_i s_i$$

ক. অনুরণনের সাহায্যে শোষণাংক-নির্ণয় : নানা ভাবে এই পদ্ধতি ব্যবহার করা হয়। এই প্রথায় নির্ণয়ের প্রথম কাজ স্যাবাইন-এর। তিনি প্রথমে ঘরটি ব্যবহারের সময় কি কি পদার্থ থাকবে এবং কোথায় কোথায় থাকবে, সেইভাবে পুরো গৃহসজ্জা ক'রে নিয়ে অনুরণন-কাল বার করেন; তারপর ঘর ফাঁকা ক'রে নিয়ে খোলা জানলার মাপ দরকারমতো বাড়িয়ে সমান অনুরণন-কাল প্রতিষ্ঠা করেন; তখন দুয়ের শোষণ সমান। ব্যবহৃত শোষকের এবং খোলা জানলার ক্ষেত্রফলের অনুপাতই নির্ণেয় শোষণাংক।

বিকল্প প্রক্রিয়ায়, প্রথমে ফাঁকা ঘরে অনুরণন-কাল (T_1) বার করা হয়। তারপর ব্যবহার্য শোষকপদার্থ যথাস্থানে বিন্যস্ত ক'রে নতুন অনুরণন-কাল (T_2) নির্ণয় করা হয়। শোষক পদার্থের মোট ক্ষেত্রফল (S) হলে, স্যাবাইন-সূত্র থেকে তার শোষণাংক দাঁড়ায়

$$\alpha = \frac{0.05V}{S}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \qquad (১৯\text{-}৬.১)$$

ঘরের শাব্দপরিকল্পনায় গড় শোষণাংকের (α) মানই বেশী কাম্য। এই রাশিটি, ঘরের সর্বত্র সবরকম কোণে আপতিত শব্দের মোট শোষণ এবং

সমগ্র শোষকতলের ক্ষেত্রফলের অনুপাত। তার মান কেবলমাত্র শোষক-উপাদানের বেধ এবং স্থাপন-রীতি (mounting)-নির্ভর এবং ঘরে শাব্দশক্তির বণ্টন-নিরপেক্ষ। গড় শোষণাংক নির্ণয়ে দুই ভিন্ন ক্ষমতার স্বনক ব্যবহার করা হয়; তারা যে চরম প্রাবল্য (I_0 এবং I_0') সৃষ্টি করে, সেগুলি স্বনকের উৎপাদ P_0 এবং P_0'-এর আনুপাতিক। তাহলে দেখানো যায় যে

$$\alpha = \frac{4V}{cS} \frac{2.303 \log (P_0/P_0')}{T_1 - T_2} \qquad (১৯\text{-}৬.২)$$

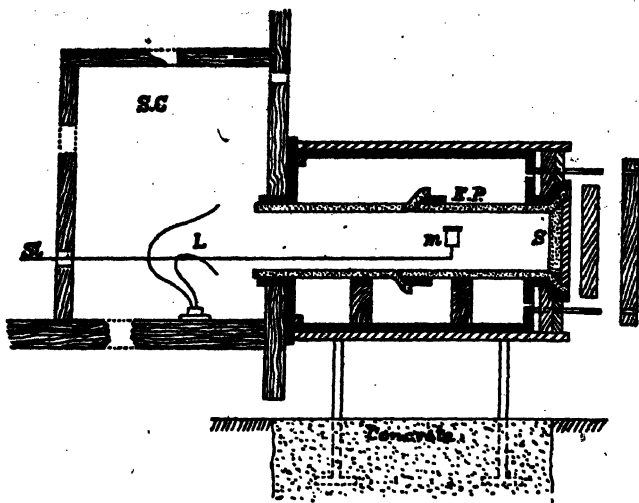
দুই স্বনকের দরুন অনুরণন-কাল মেপে নিলে এই সমীকরণ থেকে গড় শোষণাংক বার করা যায়।

অনুরণন-কক্ষ অত্যন্ত সতর্কতা-সহকারে তৈরী করা দরকার। এই কক্ষে (১) কোনরকম বাইরের শব্দ ঢুকতে পারবে না; (২) দেয়ালগুলিতে শোষণ কমাতে হবে, যাতে অনুরণন-কাল দীর্ঘ হয়; (৩) বেশ অনেকখানি শোষকপদার্থ ধরতে পারে এরকম বড় হওয়া দরকার। পরীক্ষায় দুটি স্বনকের বদলে একটি সুবেদী দোল-কুণ্ডলী লাউড-স্পীকার ব্যবহার করা হয়, তার সৃষ্ট শব্দ-উৎপাদ $P = Ki^2$; K ধ্রুবক এবং i প্রত্যাবর্তী লাউড-স্পীকার বিদ্যুৎ-ধারা। সুতরাং প্রবাহমাত্রা বদল ক'রে শব্দ-উৎপাদ বদ্‌লানো যায়। এই প্রক্রিয়াতে আদি প্রাবল্য ইচ্ছামতো বাড়ানো সম্ভব। এর সাহায্যে মেপে শোষণের মান আসে

$$\alpha S = A = \frac{4V}{c} \cdot \frac{\ln i_1^2/i_2^2}{T_1 - T_2} \qquad (১৯\text{-}৬.৩)$$

$\ln i_1^2/i_2^2$ এবং $(T_1 - T_2)$-র মধ্যে লেখচিত্র আঁকলে একটি সরলরেখা আসে; তার নতিকে $4V/c$ দিয়ে গুণ করলে শোষণের মান পাওয়া যায়। শোষণ কম্পাংক-নির্ভর ব'লে প্রত্যাবর্তী প্রবাহের কম্পাংক বদল ক'রে ক'রে পরীক্ষণ চালানো দরকার। একটি বৈদ্যুতিক রিলে ও ক্রোনোগ্রাফের সাহায্যে অনুরণন-কাল মেপে কানে তা মাপার অনিশ্চয়তা দূর করা হয়। এই প্রণালী আপাতদৃষ্টিতে স্থূল মনে হলেও, ফল কিন্তু নির্ভরযোগ্য এবং সূক্ষ্মই হয়।

খ. স্থাণুতরঙ্গ পদ্ধতি : এই পদ্ধতি টেলর-এর উদ্ভাবিত এবং প্যারিস তাকে সংস্কৃত ও মার্জিত করেন। এখানে (চিত্র 19.8) এক ফুট ব্যাসের এক লম্বা চিনামাটির নলের এক প্রান্ত পরীক্ষাধীন উপাদান (S) দিয়ে বন্ধ আর অপর প্রান্ত ঢেকে থাকে এক লাউড-স্পীকারের (L) মুখ-নল। স্পীকারটি একটি শব্দনিরুদ্ধ বাক্সের (SC) মধ্যে বসানো থাকে। নলটিও ফেল্ট-আবৃত

আর একটি বাক্সের মধ্যে থাকে। লাউড-স্পীকার-উদ্ভূত শব্দ S-এ প্রতিফলিত হয়ে স্থাণুতরঙ্গের সৃষ্টি করে। এখানে কিন্তু প্রতিফলিত শব্দ-প্রাবল্য কম

চিত্র 19.8—শোষণাংক-নির্ণয়ের স্থাণুতরঙ্গ পদ্ধতি

হওয়ায় নিস্পন্দবিন্দুতে সরণ শূন্য হয় না (§৫-১৪থ দেখ)। একটি সরু রডের (Sl) প্রান্তে ছোট্ট তপ্ত-তার মাইক্রোফোন (m) থাকে। রড্‌টিকে ঠেলে সরিয়ে সুস্পন্দ ও নিস্পন্দ তলের অবস্থান নির্ণয় করা হয়। তারা নলের অক্ষ বরাবর একান্তরভাবে এবং সম-ব্যবধানে থাকে। যদি কোন সরণ-সুস্পন্দতলে বিস্তারের মান a_1 এবং সরণ-নিস্পন্দতলে বিস্তারের মান a_2 হয়, তাহলে নির্ণেয় শোষণাংক হয়

$$\alpha = 4a_1a_2/S(a_1+a_2)^2 \qquad (১৯-৬.৪)$$

সমালোচনা ঃ এই পন্থা অনেক সরল এবং দ্রুতকর্মা। পরীক্ষাধীন শোষকের নমুনা ছোট হলেও চলে, কিন্তু এতে ত্রুটিও অনেক ঃ (১) এখানে শব্দের আপতন কেবলমাত্র লম্ব বরাবর ঘটে, অথচ বাস্তবে আপতন যেকোন কোণে ঘটতে পারে। (২) শোষক পদার্থের স্বল্পাংশের শোষণাংক তারই বিস্তৃততর তলের তুলনায় কম হয়। (৩) বাস্তবে পদার্থটি যেমনভাবে স্থাপন করা হয়, নলে সেভাবে রাখা যায় না, অথচ আপতন-কোণের ওপর শোষণ নির্ভর করে; এইসব কারণে প্রথম পদ্ধতির তুলনায় এই প্রণালীতে শোষণাংকের মান কম আসে।

মনে রাখা দরকার, তার নানা ভৌত ধর্ম ছাড়াও মাপনপ্রণালী, নমুনার

ক্ষেত্রফল এবং স্থাপনপ্রণালী ইত্যাদি ভেদে শোষকের শোষণাংকের মান আলাদা আলাদা হয়। সুতরাং তার নির্দিষ্ট সর্বগ্রাহ্য কোন মান পাওয়া সম্ভব নয়; বাস্তবে তার প্রয়োজনও নেই।

১৯-৭. শ্রবণাগারের নক্সা পরীক্ষা :

(ক) **লহরী-আধার** (*Ripple tank*) পন্থা : প্রস্তাবিত শ্রবণাগারের শাব্দত্রুটি অন্বেষণ করতে তার একটি ছোট্ট মডেল তৈরী ক'রে তাকে পারদের এক অগভীর পাত্রে রাখা হয়। শ্রবণাগারের যে জায়গায় স্বনক থাকার কথা সেই জায়গায় একটি সরু শলাকা পারদতল স্পর্শ ক'রে থাকে। শলাকাটি একটি স্বল্পকম্পাংক সুরশলাকার এক বাহুতে লাগানো আর তার স্পন্দন বিদ্যুৎ-চালিত। শলাকার স্পন্দনে পারদতলে লহরীমালা উৎপন্ন হয়। তারা মডেলের বিভিন্ন জায়গা থেকে প্রতিফলিত হয়ে আসে। ক্রমাগত আলোক-চিত্র নিয়ে নিয়ে প্রতিফলিত লহরীমালার গতিপ্রকৃতি নিরবচ্ছিন্নভাবে লক্ষ্য করা হয়। তা থেকে তারা কোথাও বেশী মাত্রায় সংহত হচ্ছে কিনা, বা কোথাও মোটেই পৌঁছচ্ছে না—এইসব দেখতে পাওয়া যায়। তখন নক্সায় প্রয়োজনীয় সংশোধন করা হয়। মডেলের মাপজোখ এবং সুরশলাকার কম্পাংক এমনভাবে বেছে নেওয়া হয়, যাতে প্রস্তাবিত শ্রবণাগারের এবং ব্যবহৃত শব্দতরঙ্গের দৈর্ঘ্য সেই সেই অনুপাতে হয়।

(খ) **স্ফুলিঙ্গ-ঘাত** (*Spark pulse*) পন্থা : ৬-১ অনুচ্ছেদে শব্দের আলোকচিত্র-গ্রহণ প্রসঙ্গে স্ফুলিঙ্গ-শব্দঘাত-উৎপাদনের যে পন্থা বর্ণিত হয়েছে, স্যাবাইন শ্রবণাগার-পরীক্ষণে প্রথম সেই পন্থায় কাজ করেন। এখানে মডেলের মধ্যে একটি ফাঁকে এক স্ফুলিঙ্গ আলো উৎপন্ন করে, আরেক ফাঁকে তাই থেকে উৎপন্ন হয় শব্দঘাত; দ্বিতীয়টির উৎপত্তি প্রথমটির সামান্য আগে করা হয়। শব্দঘাতের অগ্রগতি আলোর সাহায্যে আলোকচিত্রে সমানে গৃহীত হতে থাকে, যেমন লহরী-আধারে করা হয়ে থাকে। শব্দস্ফুলিঙ্গের আলো থেকে আলোকচিত্রকে আড়াল করার স্বয়ংক্রিয় ব্যবস্থা থাকে। দরকারমতো শব্দঘাত ও আলোক-স্ফুলিঙ্গের মধ্যে কালক্ষেপ বদ্‌লানো যায়। এই পরীক্ষণের মূল পন্থাটি আগের মতোই।

১৯-৮. অপস্বর-নিবারণ ও শব্দের অন্তরণ (Noise reduction and Sound insulation) :

পূর্বে আমরা অপস্বর এবং তার হানিকর প্রভাবের কথা বলেছি। বর্তমানে শব্দ, সভ্যতার এক উৎপাত বা অভিশাপস্বরূপ হয়ে দাঁড়িয়েছে।

মানসিক স্বাস্থ্য এবং কর্মদক্ষতা বজায় রাখতে শব্দের উৎপাত থেকে মানুষকে বাঁচানো অপরিহার্য। যেকোন জন-অনুষ্ঠানে বা কর্মস্থলে, যেমন বিদ্যায়তনে বা অফিসে, শব্দের অন্তরণ আবশ্যিক হয়ে উঠেছে।

বাইরে থেকে কোন ঘরে শব্দ আসে বাড়ির বাইরে থেকে বা বাড়িরই অন্য অংশ থেকে; ভেতরের শব্দ আসে ঘরের মেঝে, ছাত, দেয়াল প্রভৃতির মধ্যে দিয়ে। বাইরের এবং ভেতরের দু'রকম শব্দই হাওয়ায় ভেসে কিম্বা বাড়ির কাঠামোর মধ্যে দিয়ে পরিচালিত হয়ে আসতে পারে। আবার, ঘরের মধ্যেই সচল যন্ত্রপাতি, মোটর, টাইপরাইটার অপস্বর সৃষ্টি করতে পারে।

সমতলীয় কোন তরঙ্গ লম্বভাবে দেয়ালে পড়লে, অভ্যন্তরে প্রবিষ্ট শব্দপ্রাবল্যের আনুমানিক হানি $20 \log_{10}\pi\rho_w tn/\rho c$ ডেসিবেল মতো হয়; এখানে t দেওয়ালের বেধ, ρ_w দেওয়ালের উপাদান সমসত্ত্ব ধ'রে নিয়ে তার ঘনত্ব, n তরঙ্গের কম্পাংক, ρc বায়ুর বিশিষ্ট-বাধ। বেধ দ্বিগুণ করলে, হানি 6 ডেসিবেল বাড়ে। আপতন অক্রমদিক্ (random) হলে, হানি 5 ডেসিবেল হয়। দুই সমবেধ দেয়ালের মধ্যে বায়ুস্তর রাখলে প্রাবল্যের পরিবহণ-ক্ষয় কিন্তু দ্বিগুণ হয় না। নানান সংযোগ থাকায় এবং বায়ুপ্রকোষ্ঠে অনুনাদ হওয়ায় ক্ষয়ের পরিমাণ ততটা হয় না।

দরজা শব্দপ্রবেশের প্রত্যক্ষ ও পরোক্ষ পথ। দরজা বন্ধ থাকলেও কিনারার ফাঁক দিয়ে সরাসরি এবং দরজার উপাদানের মধ্যে দিয়ে পরোক্ষ পথে শব্দ ঘরের ভেতরে ঢোকে। জোড়া (double) দরজা ব্যবহার ক'রে এবং কিনারায় রবার বা ফেল্টের পটি লাগিয়ে শব্দ-অন্তরণ করা সম্ভব। প্রায় 4″ মতো ব্যবধানে আলাদা ফ্রেমে জোড়া **জানলা** বসিয়ে গবাক্ষপথে শব্দ-পরিবহণ অনেক কমানো যায়।

কঠিনের বিশিষ্ট-বাধ বায়ুর তুলনায় অনেক বেশী ব'লে দেয়াল, জানলা-দরজা দিয়ে সামান্য শব্দই ঢোকার কথা; কিন্তু এ-কথা, অসীম বিস্তারের দেয়ালে এবং অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের ক্ষেত্রেই মাত্র প্রযোজ্য। দেয়াল পাতলা হলে শব্দের অনেকখানিই ঢোকে। এ-ছাড়া প্যানেল, দেয়াল, জানলা প্রভৃতিতে নমনজাত (flexural) স্পন্দন হতে পারে। সর্বত্র গাড়িতে এইজাতীয় স্পন্দনই অপস্বর সৃষ্টি করে। প্যানেলে রবার-জাতীয় শোষকপদার্থ আঠা দিয়ে লাগিয়ে এই স্পন্দন অবদমিত করা যায়।

মেজে বা ছাদের মধ্য দিয়েও শব্দের পরিবহণ হতে পারে। ভাসমান

(floating) মেঝে এই সমস্যার সমাধান। জয়েস্টের ওপর ফাইবার-গ্লাসের মোটা আস্তরণ বিছিয়ে, তার ওপর কাঠের মেঝে বসানো হয়। দেয়াল থেকে মেঝেকেও ফাইবার-গ্লাস দিয়ে বিচ্ছিন্ন রাখা চলে। ফাইবার-গ্লাসের তলায় বালি ঢেলে তলার ছাদকে শব্দ-অন্তরিত করা যায়। কর্ক, কার্পেট, কার্ডবোর্ড পেতে বা কাঠের গুঁড়ো বা বালি ছড়িয়ে মেঝেকে শব্দ-অন্তরিত করা হয়। বেতার-সম্প্রচার স্টুডিওতে সেলোটেক্স অন্তরক হিসাবে বহুল ব্যবহৃত পদার্থ। টাইপরাইটার বা সচল যন্ত্রপাতি মোটা শোষক-প্যাডের ওপর বসিয়ে শব্দের উৎপাত কমানো হয়।

প্রশ্নমালা

১। কোন হল্‌ঘরে অনুরণন কেন হয়, বুঝিয়ে বল। অনুরণন কি ক'রে কমানো যায়? অনুরণন-কাল কাকে বলে? কেমন ক'রে মাপা হয়? অনুরণন-কালের স্থায়িত্ব কি-ভাবে বদ্‌লানো সম্ভব?

২। কোন তলের শোষণ এবং শোষণ-গুণাংকের সংজ্ঞা লেখ। স্যাবিন কি? অনুরণন-কাল থেকে শোষণ-গুণাংক কেমন ক'রে মাপা যায়? এই গুণাংক কিসের কিসের ওপর নির্ভর করে? শোষণ-গুণাংক মাপার বিভিন্ন পদ্ধতির গুণাগুণ আলোচনা কর।

৩। কোন কক্ষের শাব্দবৈশিষ্ট্য ভালো বা খারাপ বলতে কি বোঝায়? কি কি সর্ত পূরণ হলে ঘরটিকে সুশ্রবণ-কক্ষ বলা যায়? যথাযথ অনুরণন-কাল হলে সুশ্রবণ কি-ভাবে সম্ভব?

৪। প্রাণবন্ত ও নিষ্প্রাণ কক্ষ বলতে কি বোঝায়? এ প্রসঙ্গে অনুরণন-কালের ভূমিকা কি? জলসাঘরের শাব্দবৈশিষ্ট্য শ্রোতা-সমষ্টির ওপর কি-ভাবে নির্ভর করে?

৫। কোন বদ্ধ কক্ষে স্বনক থেমে যাওয়ার পর ঘরে শক্তি-ঘনত্ব-হ্রাসের সময়-হার নির্ণয় কর।

অনুরণন-কালের স্যাবাইন-সূত্র নির্ণয় কর। কি কি অঙ্গীকার এর ভিত্তি? এই সূত্রের প্রয়োগক্ষেত্র এবং সীমিতত্ব আলোচনা কর। অঙ্গীকারগুলি কতদূর তত্ত্বসম্মত বলা যায়?

৬। অনুরণন-কালের অন্য সূত্রগুলি কি কি? তাদের ভিত্তি এবং প্রয়োগক্ষেত্র ব্যাখ্যা কর। স্যাবাইন-সূত্রের সঙ্গে তাদের তুলনা কর।

৭। কোন হল্‌ঘরের মাপ $64 \times 40 \times 25$ ঘনফিট এবং খালি অবস্থায় অনুরণন-কাল 1.60 সেকেণ্ড। ঘরে 300 জন থাকলে, অনুরণন-কাল কত হবে? (প্রতিজনের শোষণাংক 4 স্যাবিন) [1 সে]

একটি হল্‌ঘরের আয়তন 12×10^4 ঘনফিট এবং তার শোষণ 1000 বর্গফিট খোলা জানালার সমান। জলসার সুরুতে শ্রোতৃবর্গের উপস্থিতিতে শোষণ আরও 2000 বর্গফিটের মতো বেড়ে গেল। অনুরণন-কালের পরিবর্তন নির্ণয় কর। [4 সে]

ঐ ঘরেরই আয়তন 8×10^4 ঘনফিট এবং শ্রোতা-শোষণ 1000 বর্গফিটের সমান হলে, খালি ও ভর্তি অবস্থায় অনুরণন-কাল কত কত হবে?

[4 সে, 2 সে]

45 হাজার ঘনফিটের ঘরে অনুরণন-কাল 1.5 সে হলে, ঘরের মোট শোষণ কত? শোষক-তলগুলির মোট ক্ষেত্রফল 8000 বর্গফিটের মতো হলে, গড় শোষণাংক কত? [1500, প্রায় 9.19 স্যাবিন]

৮। অপস্বর-নিবারণ এবং শব্দ-অন্তরণের বিভিন্ন পন্থা সম্বন্ধে আলোচনা কর।

৯। প্রস্তাবিত কক্ষের নক্সা তৈরী ক'রে তার শাব্দবৈশিষ্ট্য কি-ভাবে পরীক্ষা করা যায়?

১০। শব্দের তরঙ্গধর্মের পরিপ্রেক্ষিতে কেমন ক'রে অনুরণনের ব্যাখ্যা সম্ভব? এই দৃষ্টিভঙ্গীর সুবিধা কি?

১১। সৌধস্বনবিদ্যা সম্বন্ধে একটি রচনা লেখ।

২০

স্বনোত্তর তরঙ্গ

(Ultrasonics)

২০-১. সূচনা :

স্বনোত্তর তরঙ্গ বলতে আমরা 20 কিলোহার্ৎজ থেকে মিলিয়ন ($\simeq 10^9 Hz$) কিলোহার্ৎজ বা গিগাহার্ৎজ (GHz) কম্পাংকের অনুদৈর্ঘ্য স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ বুঝব। এই পাল্লার নিম্নসীমা 20 KHz কর্ণগ্রাহ্য শব্দ-কম্পাংকের ঊর্ধ্বসীমা ; এর বেশী কম্পাংকে কান সাড়া দেয় না—ঠিক যেমন রঙ্গোত্তর বা অতিবেগনী (ultraviolet, $\lambda < 0.4\mu$, $n > 75 \times 10^{17}/s$) আলোতে আমাদের চোখ সাড়া দেয় না। গিগাহার্ৎজ কম্পাংকের শব্দ তো আরোই শুনি না—এরা, অর্থাৎ **অতিস্বনোত্তর** (hypersonics) তরঙ্গও আমাদের এক্তিয়ার-বহির্ভূত। আবার 10 বা তারও নিচের কম্পাংকের তরঙ্গ, **অবস্বন** (infrasonics) শব্দও, রঙ্গপূর্ব বা অবলোহিত (infra-red) আলোর মতোই আমাদের ইন্দ্রিয়-অনুভূতির বাইরে। অনেক পশুপাখীই কিন্তু স্বনোত্তর বা অবস্বন তরঙ্গে সাড়া দিতে পারে।

বর্তমানে অনেকসময়েই ulrasonics আর supersonics কথা দুটি সমার্থক হিসেবে ব্যবহৃত হয় ; আমরা কিন্তু supersonics বলতে **অধিশব্দ** বা **শব্দোত্তর** বেগ-সংক্রান্ত বিদ্যাই বুঝব। এক ম্যাক-এর কম বেগকে **অবশব্দ** (subsonic) বেগ বলে। শব্দের বেগ এক **ম্যাক**, ঘণ্টায় প্রায় 720 মাইল। বর্তমানে শব্দোত্তর বিমানের গতিবেগ 3 ম্যাক-এরও ওপরে উঠেছে। স্বনোত্তর তরঙ্গ এবং শব্দোত্তর প্রাস এখন বিজ্ঞানের সামনে নতুন এবং বিশাল সম্ভাবনাময় দিগন্ত খুলে দিয়েছে।

২০-২. স্বনোত্তর তরঙ্গের উৎপাদন-রীতি :

যেকোন যান্ত্রিক সংস্থাতেই অনুদৈর্ঘ্য, অনুপ্রস্থ বা কুন্তন-বিকৃতি ঘটানো সম্ভব ; সেই বিকৃতি হঠাৎ অপসৃত করলেই সংস্থাতে সেই সেই জাতীয় স্পন্দন হবে। সে কম্পাংক স্বনোত্তর পাল্লায় থাকলেই চারিপাশের মাধ্যমে সেই স্পন্দন সঞ্চারিত হয়ে স্বনোত্তর স্থিতিস্থাপক তরঙ্গ উৎপন্ন হবে।

তীক্ষ্ণ কম্পাংকের উৎস হিসেবে আমরা **গ্যাল্‌টন হুইশ্‌ল** (যান্ত্রিক) এবং **ট্রায়োড স্পন্দকের** (বৈদ্যুতিক) ব্যবহার ৯-২ অনুচ্ছেদে শিখেছি। নিম্ন-স্বনোত্তর (30 KHz) স্পন্দক হিসাবে এদের ব্যবহার সম্ভব। ৬-২ অনুচ্ছেদে ড্যোরাক-এর উদ্ভাবিত শব্দতরঙ্গের আলোকচিত্র-গ্রহণের আলোচনা-প্রসঙ্গে যে বড় ধারকের বিদ্যুৎস্ফুলিঙ্গ-মোক্ষণের সাহায্য নেওয়া হয়েছে, তা থেকেও স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপন্ন হয়। শব্দোত্তর বেগে নির্গত কোন গ্যাসের সূক্ষ্ম প্রবল স্রোত বোতলের মুখে প'ড়ে স্বনোত্তর প্রান্তীয়-সুর উৎপাদন করতে পারে—এই ব্যবস্থাই **হার্টম্যান জেট্‌ স্পন্দক**। ডাডেল-এর উদ্ভাবিত **স্বর-আর্ক** (চিত্র 15.6) স্বনোত্তর উৎসের কাজ করতে পারে ; তার কম্পাংক (n), আবেশাংক (L) এবং ধারকাংকের (C) বশীভূত ব'লেই তাদের যথাযোগ্য মানে, স্বনোত্তর স্পন্দন সম্ভব। স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপাদনের এই আদি রীতিগুলি আজকাল প্রায় পরিত্যক্ত।

স্বনোত্তর কম্পনের বর্তমানে উৎপাদন-রীতি তিনটি—(১) চৌম্বক-ততি (magneto-striction), (২) বৈদ্যুতিক ততি (electro-striction), এবং (৩) চাপজ স্থিতিবৈদ্যুতিক (piezo-electric)।

চৌম্বক-ততি : চৌম্বক ক্ষেত্রে প্র-(ferro) চুম্বকীয় পদার্থ রাখলে তাতে নানারকম বিকৃতি দেখা দেয় ; সামগ্রিকভাবে তাদেরই চৌম্বক-ততি বলে। এদের মধ্যে জুল এবং ভিলারি আবিষ্কৃত ঘটনাগুলিই প্রাসঙ্গিক। প্রচুম্বক-জাতীয় কোন দণ্ডকে চুম্বকিত করলে তার দৈর্ঘ্যের পরিবর্তন (Joule effect) হয়, আর সেই দণ্ডেরই অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন হলে, তার চুম্বকন-মাত্রার পরিবর্তন (Villari effect)* হয় ; স্বনোত্তর তরঙ্গের উৎপাদনে প্রথম ঘটনাটি, আর তার সন্ধান বা গ্রহণে দ্বিতীয়, অর্থাৎ বিষম ঘটনাটি কাজে লাগানো হয়েছে।

বৈদ্যুতিক ততি এবং চাপজাত বিদ্যুৎ : জোলিও এবং পিয়ের দুই ক্যুরী-ভাই প্রথম লক্ষ্য করেন (১৮৮০) যে, কোয়াৎর্জ-স্ফটিকের দুই বিপরীত তলে সমান চাপ দিলে বিপরীত আধানের প্রকাশ হয় ; চাপের বদলে টান প্রয়োগ করলেও আধানের প্রকাশ ঘটে, কিন্তু আগের উল্টো প্রকৃতির। উৎপন্ন আধানের পরিমাণ প্রযুক্ত বলের সমানুপাতিক। এই দুই ঘটনা প্রত্যক্ষ বৈদ্যুতিক

---

* এরা ছাড়াও, চৌম্বক-ততির আরও ঘটনা আছে, যেমন—চৌম্বক-ক্ষেত্রে ধারাবাহী প্রচুম্বকীয় দণ্ডে কুন্তন-বিকৃতির (পাকিয়ে-যাওয়ার প্রবণতা) ঘটনা (ভাইডম্যান-এর আবিষ্কার) এবং চৌম্বক-ক্ষেত্র বরাবর রাখা একটি বাঁকা প্রচুম্বকীয় দণ্ডের সিধা বা সোজা হওয়ার (গ্যিলেমঁ'র আবিষ্কার) প্রবণতা।

তীত—স্বনোত্তর তরঙ্গ সন্ধানে ব্যবহার হয়। এরই বিষম ঘটনা—বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে ঐ স্ফটিকখণ্ডটি রাখলে ক্ষেত্রাভিমুখ অনুযায়ী স্ফটিকের দৈর্ঘ্যের হ্রাসবৃদ্ধি—স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপাদনে কাজে লাগে। লক্ষণীয় যে, দুই শ্রেণীর তাতিতেই দুই বিষমমুখী বা অপনেয় পরিবর্তন অন্তর্ভুক্ত এবং কাজে লাগে।

তবে এই স্ফটিকখণ্ড কাটার বিশেষ ভঙ্গী বা পন্থা আছে—২০-৪ অনুচ্ছেদে আলোচিত হবে। বিশেষভাবে কাটা এই স্ফটিকের টুক্‌রো, বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে রাখলে যে যান্ত্রিক দৈর্ঘ্য-বিকৃতি (ξ) ঘটে, তার মান ক্ষেত্রপ্রাবল্যের (E) ওপর নির্ভর করে। এই সম্বন্ধটি অভিসৃতি রাশিমালা (১-২.১ সমীকরণ তুলনীয়)

$$\xi = aE + bE^2 + cE^3 + \cdots$$

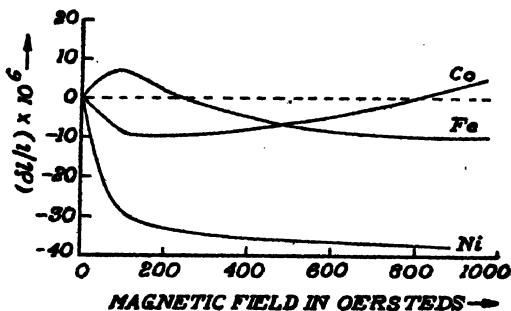
এদের মধ্যে প্রথম রাশিটিকে ($\xi \propto E$) চাপজ-বৈদ্যুত ফল, দ্বিতীয়টিকে ($\xi \propto E^2$) বৈদ্যুত-তাতি সংক্রান্ত ফল ব'লে ধরা হয়। (প্রকৃতক্ষেত্রে রাশিক্রমটির সব অযুগ্ম রাশিগুলি প্রথম-নামীয় এবং সব যুগ্মগুলি দ্বিতীয়-নামীয় ঘটনার অঙ্গীভূত ; তবে উচ্চতর রাশিগুলির সহগ-শ্রেণী সাধারণত নগণ্যমান)। কোয়াৎ´জ, ট্যুরম্যালিন, লিথিয়াম হাইড্রেট, অ্যামোনিয়াম ডাই-হাইড্রোজেন ফসফেট (ADP) প্রভৃতি স্ফটিকে চাপজ-বৈদ্যুত এবং রোচেল সল্ট বা বেরিয়াম টাইট্যানেটের মতো ফেরো- তথা প্র-বৈদ্যুতিক স্ফটিকে বৈদ্যুত-তাতি আচরণ সহজেই প্রকাশ পায়। অবশ্য দ্বিতীয় শ্রেণীর স্ফটিকমাত্রেই চাপজ-বৈদ্যুত আচরণও দেখা যায়।

২০-৩. চৌম্বক-তাতি এবং তৎচালিত স্পন্দক:

জুল প্রথম লক্ষ্য করেন যে, কোন চৌম্বকক্ষেত্রে একটি প্রচুম্বকীয় পদার্থের রড্ রাখলে, তার দৈর্ঘ্যের সামান্য পরিবর্তন (লক্ষে দু'-এক ভাগ মাত্র) ঘটে। চুম্বকনের ফলে, উপাদান নির্বিশেষে কোন প্রচুম্বকীয় দণ্ডের দৈর্ঘ্যের এই সামান্য হ্রাসবৃদ্ধিকেই আমরা চৌম্বক-তাতি ব'লবো। এরই বিপরীত ঘটনা আবিষ্কার করেন ভিলারি—যান্ত্রিক পন্থায় কোন প্র-চুম্বকীয় দণ্ডের দৈর্ঘ্য বদ্‌লালে তাতে অনুদৈর্ঘ্য চুম্বকনের আবির্ভাব ঘটে।

চৌম্বকক্ষেত্রে প্র-চুম্বকীয় পদার্থের অনুদৈর্ঘ্য বিকৃতি $(\delta l/l)_M$, চৌম্বক-প্রাবল্যের ওপর নির্ভরশীল। ক্ষেত্রের ফ্লাক্স-ঘনত্ব (B) যদি সম্পৃক্তি-মানের (saturation value) অনেক নিচে থাকে, তাহলে দৈর্ঘ্য-বিকৃতির সঙ্গে তার সম্পর্ক মোটামুটিভাবে

$$(\delta l/l)_M = aB^2 \qquad (২০\text{-}৩.১)$$

প্রতিরূপ দিয়ে নির্দেশ করা চলে। নিকেলের এবং তারই নানা সংকরধাতুর ক্ষেত্রে দৈর্ঘ্য-বিকৃতি তুলনায় বেশী ব'লে কার্যক্ষেত্রে এদের ব্যবহারই বেশী। 20.1 চিত্রে তিনটি প্রধান প্রধান প্রচুম্বকীয় মৌলে (element) চৌম্বক-ক্ষেত্র-প্রাবল্য (B) এবং দৈর্ঘ্য-বিকৃতির ($\delta l/l$) মধ্যে সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। নিকেলে a-র মান বরাবরই ঋণাত্মক, অর্থাৎ প্রাবল্য যত বাড়ে দৈর্ঘ্য-বিকৃতি

চিত্র 20.1—চৌম্বক-ক্ষেত্র-প্রাবল্য ও প্রচুম্বকীয় দৈর্ঘ্য-বিকৃতি

ততই কমে—প্রথমে দ্রুতহারে, পরে ধীরে ধীরে। পক্ষান্তরে লোহা এবং কোবাল্টের বেলায় a-র চিহ্ন বদ্‌লায়; লোহায় প্রথমে দৈর্ঘ্য-বিকৃতি বাড়ে, পরে কমে, আর কোবাল্টের আচরণ বিষমমুখী—তাই কার্যক্ষেত্রে এদের ব্যবহার সীমিত। আজকাল ইনৃভার, নাইক্রোম (Ni-Ch), মোনেল (Ni, Fe, Cu) প্রভৃতি সংকর ধাতুর প্রয়োগ বাড়ছে। সর্বাধুনিক চৌম্বক-তাঁত-ধর্মীয় সংকরধাতুতে (49% Fe, 49% Co এবং 2% Va) চৌম্বক-তাঁতির মান সবচেয়ে বেশী।

একটি নিকেলের দণ্ড কোন প্রত্যাবর্তী চৌম্বকক্ষেত্রে রাখলে প্রাবল্য-পরিবর্তনের এক চক্রে দণ্ডের দৈর্ঘ্যহ্রাস দু'বার হবে, কেননা এই পরিবর্তন প্রযুক্ত ক্ষেত্রের দিক্‌-নিরপেক্ষ। দণ্ডের দৈর্ঘ্যভেদ আলোচনা করতে আমরা মূলবিন্দু থেকে x দূরত্বে কণার সরণ ξ ধ'রবো; সেখানে প্রস্থচ্ছেদ A হলে, সক্রিয় অনুদৈর্ঘ্য বলের মান হবে

$$F_a = (\text{ যান্ত্রিক পীড়ন} + \text{চৌম্বক-তাঁতজ পীড়ন }) \times \text{ক্ষেত্রফল}$$

$$= q\left[\frac{\partial \xi}{\partial x} + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_M\right]A = qA\left(\frac{\partial \xi}{\partial x} - aB^2\right)$$

তাহলে δx ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্যাংশে এই বলের ভেদন (variation) হবে

$$\delta F_x = qA\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \cdot \delta x - 2aB.\delta B\right) \qquad (২০\text{-}৩.২)$$

$$= qA\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\delta x - \lambda A.\delta B$$

এখানে λ-কে $(=2aqB)$ চৌম্বক-তত্তি ধ্রুবক বলে। আবার চৌম্বক-তাতির ক্রিয়া অপনেয় (reversible) হওয়ায়, বলা চলে যে, চৌম্বক-ক্ষেত্র এবং যান্ত্রিক বিকৃতি দুয়ের ভেদের মিলিত ক্রিয়ায় ফ্লাক্স-ঘনত্বের পরিবর্তন (δB) ঘটে। এখন

$$\delta B = \delta[\mu H + 4\pi J.\delta x]$$

$$= \mu[\delta H + 4\pi\lambda.(\partial^2\xi/\partial x^2)\delta x]$$

এখানে J হচ্ছে H ক্ষেত্র-প্রাবল্যের ক্রিয়ায় একক আয়তনের পদার্থে আরোপিত চুম্বকন-ঘনত্ব আর μ হচ্ছে পদার্থের চুম্বকশীলতা (permeability)। এখন δx ক্ষুদ্র দৈর্ঘ্যাংশে চৌম্বক-ক্ষেত্র-প্রাবল্য প্রায় অপরিবর্তিত থাকে ব'লে, $\delta H = 0$ ধরা যায়। তাহলে

$$\delta B = 4\pi\lambda\mu(\partial^2\xi/\partial x^2)\delta x \qquad (২০\text{-}৩.৩)$$

২০-৩.২ সমীকরণে δB-র এই মান বসালে পাচ্ছি

$$\delta F_x = A(q - 4\pi\lambda^2\mu)\frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}.\delta x$$

বা $\quad \rho A\delta x.\ddot{\xi} = A(q - 4\pi\lambda^2\mu)\delta x\,(\partial^2\xi/\partial x^2) \qquad (২০\text{-}৩.৪)$

সুতরাং নিকেল-দণ্ডে অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেগ হবে

$$c_l = \sqrt{(q - 4\pi\mu\lambda^2)/\rho} = \left[\frac{q}{\rho}\left(1 - \frac{4\pi\mu\lambda^2}{q}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[\frac{q}{\rho}(1-\kappa^2)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (\kappa^2 = 4\pi\mu\lambda^2/q) \qquad (২০\text{-}৩.৫)$$

এখানে κ যান্ত্র-বৈদ্যুত যোজন-গুণাংক। তাহলে দণ্ড একপ্রান্তে আটকানো থাকলে, তার মূল রীতিতে কম্পাংক হবে

$$n = c_l/4l = \frac{1}{4l}\left[\frac{q}{\rho}(1-\kappa^2)\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (২০\text{-}৩.৬)$$

অর্থাৎ চৌম্বক-ভতি, দণ্ডের মূল কম্পাংকের মান $(\kappa/4l)\sqrt{q/\rho}$ পরিমাণে কমিয়ে দেয়। চৌম্বক-ভতি না থাকলে $(\lambda=\kappa=0)$, অর্থাৎ দণ্ডকে বিচুম্বকিত করলে তার অদমিত কম্পাংক অক্ষুণ্ণ থাকবে।

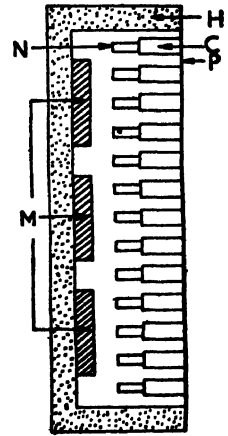
বাস্তবে নিকেল-রড্‌কে প্রত্যাবর্তী ধারাবাহী সলেনয়েডের ভেতর রেখে চৌম্বক-ভতি ঘটানো হয়; সেখানে চৌম্বক স্পন্দন-কম্পাংক ধারা-কম্পাংকের দ্বিগুণ। প্রত্যাবর্তী ধারার ওপর দিষ্ট ধারার সমাপতন ঘটিয়ে বা দণ্ডটিকে স্থায়ী চৌম্বকক্ষেত্রে রেখে দুই কম্পাংক সমান করা যায়। স্বভাবতই ধারা-কম্পাংক মূল দণ্ড-কম্পাংকের সমান হলে দণ্ডের স্পন্দনবিস্তার চরম-মান হয় এবং আশেপাশের মাধ্যমে উচ্চ কম্পাংকের অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গ উৎপন্ন হয়।

চৌম্বক-ভতি-চালিত স্পন্দক : (১) 20.2 চিত্রে বিজ্ঞানী পিয়ার্স-এর উদ্ভাবিত ভাল্‌ভ্‌-চালিত একটি সরল স্পন্দকের বৈদ্যুতিক বর্তনী দেখানো হয়েছে। এতে R, মধ্যবিন্দুতে আটকানো নিকেল রড্‌; রডের আবেষ্টনী বর্তনীতে প্রত্যাবর্তী ধারা চললে, রডে ঘূর্ণীপ্রবাহ (eddies) হয়ে শক্তিক্ষয় হয় ব'লে আজকাল দণ্ডের বদলে সরু সরু অন্তরিত নিকেলের তারের একটি বাণ্ডিল ব্যবহার করা হচ্ছে। দিষ্টধারাবাহী কুণ্ডলী, দণ্ডে স্থায়ী চুম্বকন আনে; তবে এই ধারার সঠিক (optimum) মান নির্ণয়ে নানা অসুবিধা। দণ্ডের L_1 এবং L_2 অংশ, দুই প্রত্যাবর্তী ধারাবাহী সলেনয়েড C_1, C_2 দিয়ে বেষ্টিত; তারা যথাক্রমে ভাল্‌ভের গ্রিড ও প্লেটের সঙ্গে যুক্ত। ভাল্‌ভ্‌ এই ধারাকম্পাংক নিয়ন্ত্রিত করে; মিলি-অ্যামিটার (mA) প্লেট-বর্তনীতে ধারামান নির্দেশ করে। বর্তনীতে স্পন্দন প্রতিষ্ঠিত হলে এর পাঠ বদ্‌লায়। অনুনাদী স্পন্দনে যে দৈর্ঘ্যভেদ ঘটে তা প্রত্যক্ষ চুম্বকনে উৎপন্ন দৈর্ঘ্যভেদের প্রায় [illegible]গ।

চিত্র 20.2—চৌম্বক-ভতি-চালিত স্পন্দকের বর্তনী (পিয়ার্স)

চুম্বকনে দৈর্ঘ্যহ্রাস এবং দৈর্ঘ্যহ্রাসে চুম্বকনভেদ এই দুই বিষমমুখী ঘটনার

একত্র সমাবেশই স্পন্দনক্রিয়ার সূত্রপাত এবং লালন করে। যেমন ধরা যাক, প্লেট-বিভবভেদ এমন দিকে C_2-তে প্রবাহ পাঠাল যে, দণ্ডটি ছোট হয়ে গেল; ফলে দণ্ডের স্থায়ী চুম্বকনমাত্রা বদ্‌লালো; তাতে ফ্লাক্স বদ্‌লে গিয়ে C_1 কুণ্ডলীতে সংশ্লিষ্ট বলরেখার পরিবর্তন হবে; তার ফলে তাতে বি-মুখী বিভবভেদের আবেশ হবে। C_1 এমনভাবে গ্রিডের সঙ্গে যুক্ত থাকে যে, এই আবিষ্ট বিভবভেদ প্লেট-প্রবাহে বিবর্ধিত পরিবর্তন ঘটাবে এবং সেই বিবর্ধিত ধারা C_2-তে প্রবাহিত হবে। এইভাবেই বৈদ্যুতিক স্পন্দনের সূত্রপাত হয় এবং পরিবর্তী ধারকের (C) ক্রিয়ায় তার কম্পাংক দণ্ডের অনুনাদ-মানে পৌঁছে দেওয়া হয়। উৎপন্ন কম্পাংক প্রযুক্ত বিভববৈষম্যের ওপর নির্ভর করে না।

(২) 20.3 চিত্রে একটি চৌম্বক-তাতি-নিয়ন্ত্রিত ছোট্ট স্পন্দক দেখানো হয়েছে। এতে অনেকগুলি নিকেলের নল (N) পরপর সাজানো; তাদের দৈর্ঘ্য, কাঙ্ক্ষিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের এক-চতুর্থাংশ এবং তারা P পাতে দৃঢ়ভাবে আটকানো থাকে; আর গোটা সমাবেশটাই প্রত্যাবর্তী ধারাবাহী কুণ্ডলীশ্রেণীর (C) ক্রিয়ায় স্পন্দিত হয়। পাতের মাপ এমন থাকে যে সমগ্র সংস্থাটিই নলগুলির সমকম্পাংক হয়। একটি জোরালো বৈদ্যুতিক বর্তনী প্রতিটি C কুণ্ডলীতে সমদশায় প্রবাহ যোগায়। সংস্থাভুক্ত (H) স্থায়ী চুম্বকগুলি (M) নলগুলিতে (N) প্রয়োজনমতো চুম্বকন আরোপ করে। চৌম্বক-তাতি অপনেয় ঘটনা ব'লে এই উৎসকেই আবার স্বনোত্তর তরঙ্গের সন্ধানী বা গ্রাহক-ভাবেও ব্যবহার করা যায়।

চিত্র 20.3—স্বনোত্তর চৌম্বক-স্পন্দক

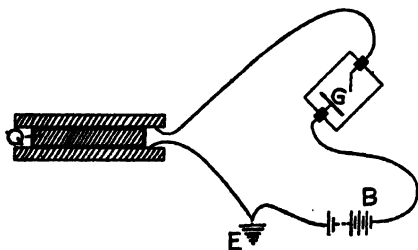
সুবিধা ও অসুবিধা ঃ চৌম্বক-তাতি-চালিত স্পন্দক পারিপার্শ্বিক মাধ্যমে প্রবল পীড়ন উৎপন্ন করতে পারে; তাই প্রবল শব্দবাধা থাকা সত্ত্বেও, জলে শব্দসংকেত প্রেরণ ও সন্ধানে তা বিশেষ উপযোগী। তাই, প্রায়োগিক জলৌন (underwater) স্বন-ব্যবস্থা, *SONAR* (sound navigation and ranging)-এর উন্নতমানের দক্ষতা ও কৃতি এইজাতীয় স্পন্দকের অবদান।

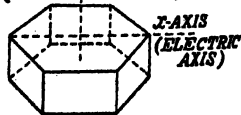
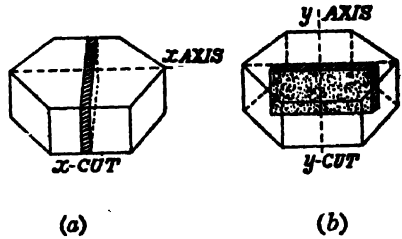
তবে এই প্রণালীতে 60 কিলোচক্রের বেশী কম্পাংকে তরঙ্গ উৎপাদন করানো হয় না। কারণ এই মূল কম্পাংকে, স্পন্দক নিকেল-দণ্ড মাত্র 2 সেমি মতো লম্বা হয়; হ্রস্বতর দণ্ডে মূলস্পন্দন-উৎপাদন শক্ত ব্যাপার; অথচ

সমমেল উৎপাদন ক'রে কম্পাংক বাড়াতে গেলে সরবরাহিত শক্তির অনেকটাই অপচয় হয়। 20 থেকে 30 কিলোচক্রের মধ্যেই এই শ্রেণীর স্পন্দকের কৃতি-মান উচ্চতরের। এই পাল্লার মধ্যে মূলকম্পাংকে চরম যান্ত্রিক-বিকৃতির ($\delta l/l$) মান 10^{-4} পর্যন্ত করা যায় এবং উৎপন্ন পীড়নমাত্রা স্বভাবী বায়ুচাপের 200 গুণ পর্যন্ত যেতে পারে।

লক্ষাধিক (> 100 কিলোহার্ৎজ) চক্রের স্বনোত্তর কম্পাংক উৎপাদনে বৈদ্যুত-তাতি কাজে লাগানো হয়।

২০-৪. পীড়ন-জাত বিদ্যুৎ এবং চাপবৈদ্যুত স্পন্দক :

কোয়ার্ৎজ-স্ফটিকের দুই বিপরীত তলে চাপ বা টান প্রয়োগ ক'রে বিকৃতি ঘটালে যে সেখানে বিপরীতধর্মী আধানের প্রকাশ ঘটে (বৈদ্যুতিক তাতি) সে-কথা আগেই বলা হয়েছে। এই স্ফটিক থেকে নির্ধারিত ভঙ্গীতে কাটা পাতে চাপ দিলে আধান-প্রকাশ চরম হয়। 20.4 চিত্রে x-ছাঁটে কাটা (চিত্র 20.6a) কোয়ার্ৎজ-স্ফটিক পাতে চাপ-প্রয়োগে আধান-প্রকাশের ঘটনা দেখানো হয়েছে ; Q পাতটিকে দুই ধাতু-পাতের মধ্যে রেখে চাপ দেওয়া হয়। ওপরের পাতটি উইল্‌সন-উদ্ভাবিত একটি সূক্ষ্ম নত-পত্র (tited leaf) তড়িৎ-বীক্ষকের (G) চল-পত্রের সঙ্গে যুক্ত। অপর পাতটি এবং ব্যাটারীর (B) একটি প্রান্তিক ভূমিতে (E) যুক্ত। ব্যাটারীর অপর প্রান্তিকের সঙ্গে তড়িৎ-বীক্ষণের স্থির পাতটি যুক্ত ; তাতে দুই পত্রের মধ্যে বিভবভেদ বজায় থাকে। ওপরের পাতে চাপ দিলে চলপত্রের বিক্ষেপ হয় -বিক্ষেপ চাপের সমানুপাতী।

চিত্র 20.4—পীড়ন-জাত বিদ্যুৎ

চিত্র 20.5—কোয়ার্ৎজ-স্ফটিকের নানা অক্ষ

কোয়াৎ´জ-পাতের নির্ধারিত ছঁাট ঃ 20.5(a) চিত্রে কোয়াৎ´জের একক স্ফটিক দেখানো হয়েছে—একটি ষড়্ভুজ প্রিজম্, তার দুই প্রান্তে ছয়তল পিরামিড। স্ফটিকের দীর্ঘতম অক্ষ—z-অক্ষ—তাকে **আলোক-অক্ষ** বলে। এই অক্ষেরই লম্বতলে প্রথম ছেদ বা ছঁাট [চিত্র 20.5(b)]) কাটা হয়—স্পষ্টতই তার পরিসীমা ষড়্ভুজ হবে। এই ষড়্ভুজের যেকোন দুই কৌণিক বিন্দু যোগ করলেই x- বা **বৈদ্যুতিক অক্ষ** মেলে। x- এবং z- দুই অক্ষেরই সমকোণে দুই বিপরীত বাহুর মধ্যবিন্দুযোজী যেকোন রেখাই y- বা **যান্ত্রিক-অক্ষ**। 20.5(b) চিত্রে কোয়াৎ´জ-স্ফটিক থেকে কাটা একটি পর্ব (slab) এবং তার বৈদ্যুতিক ও যান্ত্রিক অক্ষ দেখানো হয়েছে। এইরকম পর্ব থেকে উচ্চ কম্পাংকে স্পন্দনক্ষম পাত নানা রীতিতে কাটা চলে। 20.6 চিত্রে x- এবং y-ছঁাটে কাটা, কোয়াৎ´জ-পাত দেখানো হয়েছে। স্বনোত্তর স্বনক এবং গ্রাহক হিসাবে x-ছঁাটের পাতের ব্যবহারই বেশী। y-ছঁাটের পাত আবার ভাল্ভ্-স্পন্দকের কম্পাংকের সুস্থিতি (stabilization)-রক্ষণে বেশী ব্যবহৃত হয়। উষ্ণতার সঙ্গে প্রথম শ্রেণীর ছাঁটে কম্পাংক সামান্য কমে; দ্বিতীয়ে সামান্য বাড়ে। কম্পাংক উষ্ণতা-নিরপেক্ষ রাখতে, বিভিন্ন স্পন্দনরীতিতে সম্ভাব্য অনুনাদ এড়াতে এবং অন্য কাজে ব্যবহারের উদ্দেশ্যে এই স্ফটিকের AB, BT প্রভৃতি নানা জটিল রীতির ছঁাট ব্যবহার করা হয়ে থাকে।

চিত্র 20.6—কোয়াৎ´জ-পাতের ছাঁট

যান্ত্রিক এবং বৈদ্যুতিক অক্ষ বরাবর চাপ এবং বিভবভেদের উৎপত্তির মধ্যে, পারস্পরিক কার্য-কারণ সম্পর্ক। কাজেই এদের যেকোন একটির পরিবর্তনের ফলে অপরটির চরম সম্ভবপর পরিবর্তন হলেই, চাপবৈদ্যুত ক্রিয়ার চরম দক্ষতা অর্জিত হয়। এজন্যে বৈদ্যুতিক মেরুধর্ম (polarisation) এবং যান্ত্রিক-ততির মধ্যে যোজন ঘনিষ্ঠতম হতে হবে। তাই স্ফটিকের ছঁাট নির্ধারিত রীতিতে হওয়া চাই এবং ভিন্ন ভিন্ন স্ফটিকে ছঁাটও তাই আলাদা আলাদা রকমের হয়।

কোয়াৎ´জ ছাড়া অন্যান্য নানা স্ফটিকেও চাপজাত বিদ্যুৎ হতে পারে। তাদের মধ্যে রোচেল সল্ট, KDP (Potassium dihydrogen

phosphate), *DKT* (Dipotassium tartarate), *LH* (Lithium hydrate), *ADP* (Ammonium dihydrogen phosphate), ট্যুরম্যালিন প্রভৃতি প্রাকৃতিক স্ফটিক এবং নানারকম কৃত্রিম সেরামিক স্ফটিক, যেমন—Barium titanate, Lead titanate zirconate প্রভৃতি উল্লেখযোগ্য। সেরামিক স্ফটিকগুলিকে জোরালো বিদ্যুৎক্ষেত্রে রেখে বৈদ্যুতিক মেরুধর্মী ক'রে নেওয়া হয়। তাদের পাতের যথাযথ ছাঁট ও আকার কোয়ার্ৎ'জ থেকে আলাদা। রোচেল সল্ট এবং *ADP* স্ফটিকের পাত স্ফটিক-মাইক্রোফোনে (§ ১৫-১৩) ব্যবহার হয়; তাদের **কুন্তন পাত** বলে। ২০-৮ অনুচ্ছেদে নানা চাপ-বৈদ্যুত-ধর্মী স্ফটিকগুলির আচরণ ও কৃতির তুলনামূলক আলোচনা করা হবে।

২০-৫. কোয়াৎ'জ-পাতের স্পন্দনের রূপরেখা :

স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপাদনে বিষম (inverse) চাপজবৈদ্যুত ক্রিয়া ব্যবহৃত হয়; এখানে বৈদ্যুতিক বিভবভেদ স্ফটিকের সংকোচন বা প্রসারণ ঘটায়। যদি x-ছাঁটের কোয়ার্ৎ'জ-পাতের x-অক্ষ বৈদ্যুতিক ক্ষেত্র বরাবর থাকে তাহলে ক্ষেত্রের দিক্-সাপেক্ষে পাতটি x-অক্ষ বরাবর সংকুচিত, y-অক্ষ বরাবর প্রসারিত হবে বা বিপরীতক্রমে আচরণ করবে। প্রযুক্ত তড়িৎক্ষেত্র প্রত্যাবর্তী হলে দুই অক্ষ-বরাবরই স্পন্দন ঘটবে; x-অক্ষ-বরাবর স্পন্দনকে বেধস্পন্দনরীতি এবং y-অক্ষ-বরাবর স্পন্দনকে দৈর্ঘ্যস্পন্দনরীতি বলে। দুই রীতির যেকোনটিরই স্বভাবী কম্পাংক, প্রত্যাবর্তী ধারা-কম্পাংকের কাছাকাছি গেলেই প্রবল বিস্তারে অনুনাদী স্পন্দন হবে।

স্পন্দন-দিক্ বরাবর পাতের মাপ (বেধ t বা দৈর্ঘ্য l) তার স্বভাবী কম্পাংক নির্ধারণ করে; বেধস্পন্দনের কম্পাংক স্বভাবতই দৈর্ঘ্যস্পন্দনের তুলনায় অনেক বেশী। মূলরীতিতে স্পন্দন হলে, তরঙ্গদৈর্ঘ্য $\lambda = 2l$ এবং কম্পাংক

$$n_l = \frac{c}{2l} = \frac{1}{2l}\left(\frac{q}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2l}\left[\frac{8\times10^{11}}{2.654}\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{275}{q}\ KHz/S$$

পাতটি যেহেতু অসীম ও ক্ষীণ দণ্ড নয়, তার কম্পনে ইয়ং-গুণাংক যথাবিহিত স্থিতিস্থাপতাংক হতে পারে না (৭-৬.১); পরীক্ষণে $n_l \simeq 278.5$ কিলোচক্র পাওয়া যায়। তরল মাধ্যমে কয়েকশত কিলোহার্ৎ'জ পাল্লায় তরঙ্গ-উৎপাদনে দৈর্ঘ্যস্পন্দনরীতি এবং মেগাহার্ৎ'জ পাল্লায় বেধস্পন্দনরীতি ব্যবহৃত

হয়। দ্বিতীয় রীতিতে স্পন্দকতল বড় এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য অনেক ছোট হওয়ায় শাব্দবৈদ্যুত রূপান্তরে দক্ষতা বেশী এবং বিকীরিত তরঙ্গমালার কৌণিক অপসারিতা কম; তাই এইজাতীয় তরঙ্গ মাধ্যমে অনেকদূর পর্যন্ত যেতে পারে।

কোয়াৎর্জ-পাতে 50 মেগাহার্ৎজ পর্যন্ত কম্পাংক তোলা যায়; তখন এই মূলস্পন্দনে পাতের বেধ মাত্র 0.055 মিমি এবং কাজেই খুবই ভঙ্গুর হয়। ট্যুরম্যালিন-পাতে এরও তিনগুণ বেশী কম্পাংক পাওয়া সম্ভব। একই পাত থেকে উচ্চতর কম্পাংকের উপসুরও পাওয়া সম্ভব; বেধের তুলনায় তার স্পন্দকতল অনেক বড় হলে, উপসুরগুলি সমমেলই হয়। তবে সেক্ষেত্রে বিকিরিত প্রাবল্য অনেক কম।

যেহেতু স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপাদনে x-ছাঁট পাতের x-অক্ষ বরাবর বেধস্পন্দনরীতি কাজে লাগে, সেইহেতু এই অক্ষ বরাবর অনুদৈর্ঘ্য পীড়ন এবং বিকৃতিই কার্যকর প্রাচল। তাই চাপজাত আধানের তল-ঘনত্ব এবং পীড়ন দাঁড়াবে যথাক্রমে

$$\sigma_x = \frac{K_x V_x}{4\pi t_x} + e\frac{\delta\xi}{\delta x} \qquad (২০\text{-}৫.১)$$

$$F_x/A = -\left[\gamma\frac{\delta\xi}{\delta x} + \frac{V_x}{t_x}\right] \qquad (২০\text{-}৫.২)$$

এখানে σ_x = পাতের যেকোন তলে উৎপন্ন আধানের তল-ঘনত্ব

F_x = x-অক্ষ বরাবর তলের ওপর প্রযুক্ত বল

A = তলের ক্ষেত্রফল

K_x = x-অক্ষ বরাবর কোয়াৎর্জের মাধ্যম-বিদ্যুতাংক

V_x/t_x = পাতের দুই তলের মধ্যে উৎপন্ন ক্ষেত্র-তীব্রতা

$\delta\xi/\delta x$ = পাতে x-অক্ষ বরাবর উৎপন্ন বিকৃতি

e = চাপ-বৈদ্যুতাংক (প্রতি বর্গ সেমি তলে উৎপন্ন একক চাপজাত আধান)

γ = যথাবিহিত স্থিতিস্থাপকতাংক

এখন, δx বেধের স্ফটিক-পাতের ওপর কার্যকর বলের মান (২০-৫.২ সমীকরণ অনুসারে) হবে

$$\delta F_x = -\left(\frac{\partial F_x}{\partial x}\right)\cdot \delta x = A\left[\gamma\left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\right) + \frac{e}{t_x}\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right)\right]\delta x \quad (২০\text{-}৫.৩)$$

যেহেতু পাতের দুই তলের মধ্যে বিভবভেদ x-নিরপেক্ষ, তাই বন্ধনীর মধ্যের দ্বিতীয় রাশিটি শূন্য। কাজেই

$$\delta F_x = \gamma A \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\cdot \delta x \quad (২০\text{-}৫.৪)$$

আবার গতিসৃষ্টিকারী জড়তা-বল = ভর × ত্বরণ = $\rho A \delta x . \ddot{\xi}$

$$\therefore \quad \delta F_x = \rho A \delta x \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \gamma A \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}\delta x$$

$$\therefore \quad c_x = \sqrt{\gamma/\rho} \quad (২০\text{-}৫.৫)$$

আর পাতের স্পন্দনশীল দুই তলই সুস্পন্দবিন্দু হওয়ায়, অবকল সমীকরণের সমাধান আসবে

$$\xi = \sum_{m=1}^{m=\infty}\left(A_m \cos\frac{m\pi ct}{t_x} + B_m \sin\frac{m\pi ct}{t_x}\right)\cos\frac{m\pi x}{t_x}$$

m-এর জোড় মানে পাতের মধ্যবিন্দুতে সুস্পন্দবিন্দু হওয়ার কথা, কিন্তু সেখানে পাতের ভরকেন্দ্র (নিস্পন্দ) থাকায়, জোড় সমমেলগুলি উৎপন্ন হয় না, হয় কেবল বিজোড় সমমেলগুলি। তাই উৎপন্ন মূলরীতিতে স্পন্দনের কম্পাংক

$$n_1 = \frac{1}{2t_x}\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (২০\text{-}৫.৬)$$

পাতের মুক্ততলগুলি সুস্পন্দতল হওয়ায়, সেখানে $(\partial\xi/\partial x) = 0$ হবে; সুতরাং তাদের সংলগ্ন মাধ্যমে চাপভেদ হবে চাপবৈদ্যুত বলের সমান, অর্থাৎ

$$\delta p = -e\left(\frac{E_0}{t_x/2}\right)$$

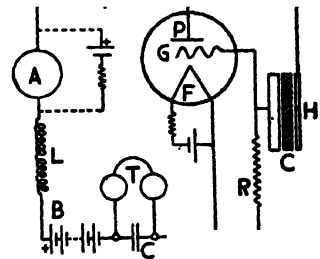
কারণ পাতের মধ্যতলটি নিশ্চল হওয়ায়, কার্যকর বেধ $\frac{1}{2}t_x$ হয়। তাই বিকিরিত তরঙ্গের তীব্রতা দাঁড়াবে

$$I_x = \frac{p_0^2}{2\rho_0 c} = \frac{2e^2(E_0)^2_x}{\rho_0 c t_x^2} \quad (২০\text{-}৫.৭)$$

এখানে $\rho_0 c$ তরঙ্গবাহী মাধ্যমের বিশিষ্ট বাধ এবং $(E_0)_n$ আরোপিত বিভববভেদ-বিস্তার। মূলকম্পাংকেই সবচেয়ে বেশী শক্তি বিকিরিত হয়।

২০-৬. ব্যবহারিক কোয়াৎ´জ-স্ফটিক

কোয়াৎ´জ-স্ফটিকের যথাযথ ছাঁটের পাতকে স্বভাবী রীতিতে কাঁপাতে তার দুই তলে অনুনাদী কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী বিভববভেদ প্রয়োগ করা দরকার— তা করা হয় স্পন্দনী ইলেকট্রনীয় বর্তনীর সাহায্যে। সেজন্যে পাতের দুই তলের ওপর খুব পাতলা ক'রে ধাতুর (সোনা, রূপো, ক্রোমিয়াম বা অ্যালুমিনিয়াম) প্রলেপ ফেলে সরাসরি তড়িৎ-সংযোগের ব্যবস্থা করা হয়। বিকিরক তলটি ভূমিযুক্ত থাকে।

এই কোয়াৎ´জ-পাতের, কয়েকশত কিলোহাৎ´জ থেকে 15 মেগাচক্র পর্যন্ত কম্পাংকের স্পন্দন সম্ভব। তবে এই স্পন্দনগুলি মূলরীতিতে ঘটে। পাতে সমমেল উৎপন্ন ক'রে কিন্তু, 500 মেগাহাৎ´জ পর্যন্ত কম্পাংক পাওয়া সম্ভব। তবে 10—15 মেগাচক্রের বেশী কম্পাংকের পাতে বেধ এত ক্ষীণ যে, পাতটি খুবই ভঙ্গুর হয়ে যাওয়ার সম্ভাবনা। কোয়াৎ´জ-স্পন্দনে ব্যবহৃত নানা বর্তনীর মধ্যে পিয়ার্স, হার্টলে এবং মিলার-এর উদ্‌ভাবিত বর্তনীগুলিরই চল বেশী। তারা যথাক্রমে 20.7, 20.8 এবং 20.9 চিত্রে চিহ্নিত। এরা সকলেই বেতার-কম্পাংকে (RF বা radio-frequency) স্পন্দনক্ষম বর্তনী।

চিত্র 20.7—কোয়াৎ´জ-স্পন্দন-বর্তনী (পিয়ার্স)

পিয়ার্স-এর বর্তনীতে স্পন্দনশীল স্ফটিক-পাত (C) দুই ধাতুপাতের মধ্যে আবদ্ধ; তাদের একটি ভাল্‌ভের প্লেটে (P) অপরটি গ্রিডে (G) যুক্ত। ভাল্‌ভ্‌ ফিলামেণ্টকে (F) একটি স্বল্পবিভবভেদের ব্যাটারী এবং পরিবর্তনীয় রোধের সহায়তায় গরম রাখা হয়। প্লেট ও ফিলামেণ্টের মধ্যে বড় একটি ব্যাটারী (B) উচ্চ বিভববভেদ বজায় রাখে। বর্তনীর এই অংশে শ্রেণী-সমবায়ে একটি উচ্চ মানের স্বাবেশ ($L \simeq 20mH$) ক্ষীণ ধারামাপী (micro-ammeter, A) এবং ধারক (C) থাকে। L কুণ্ডলীর বৈদ্যুতিক রোধও বেশী ($\simeq 20K\Omega$)। তা ছাড়া ধারকের সমান্তরালে প্রয়োজনমতো হেড-ফোন T এবং গ্রিডের শ্রেণীতে গ্রিড্‌-লীক রোধ (R) থাকে। এই স্পন্দনী-বর্তনীর ক্রিয়ায়,

C পাতের বেধ-স্পন্দন হতে থাকে এবং সামনের পাতের H ফুটো দিয়ে স্বনোত্তর তরঙ্গ সরু কিরণের আকারে বিকীরিত হয়। বর্তনীর কম্পাংক কোয়াৎ´জ-পাত-নিয়ন্ত্রিত ; তাই পাত বদ্‌লালেও প্রতিবার তান বাঁধার (tuning) দরকার পড়ে না। অভিসারী বা অপসারী স্বনোত্তর কিরণ উৎপন্ন করতে অবতল বা উত্তল আকারের স্ফটিক-পাত ব্যবহার হয়। অভিসারী পাত থেকে শক্তি-বিকিরণ বেশী হয়।

বায়ুতে স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপাদনে এই বর্তনী বিশেষ উপযোগী ; কিন্তু তরলে নয়, কেননা সেক্ষেত্রে পাতের ওপরে তরলের প্রতিক্রিয়া অনেক বেশী হওয়ায় স্পন্দন বিশেষরকম অবদমিত হয়।

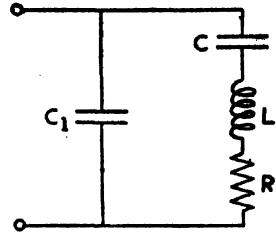
হার্টলে-উদ্ভাবিত বর্তনী (চিত্র 20.8) তরলে স্বনোত্তর তরঙ্গ-উৎপাদনে উপযোগী। এক্ষেত্রে একটি L-C স্পন্দনী বর্তনী থেকে পাতে পরবশ কম্পন আরোপ ক'রে ক'রে তাতে অনুনাদী স্পন্দন আনা হয়। C পরিবর্তী ধারক,

চিত্র 20.8—হার্টলে-উদ্ভাবিত স্বনোত্তর স্পন্দক-বর্তনী

তার ধারণক্ষমতা নিয়ন্ত্রণ করে অনুনাদ সৃষ্টি করা যায়। এই L-C বর্তনী ভাল্‌ভের প্লেট ও গ্রিডের মধ্যে C_1 ধারকের সাহায্যে যুক্ত। এখানে স্ফটিক-পাতের (Q) দৈর্ঘ্য বরাবর স্পন্দন হয়। এই ব্যবস্থায় স্পন্দন আগের ব্যবস্থার তুলনায় প্রবলতর।

মিলার-এর বর্তনীতে (চিত্র 20.9) তান-বাঁধা বা মেলবদ্ধ (tuned) প্লেট ও গ্রিড্‌ বর্তনী থাকে ; প্লেট-বর্তনীতে L-C স্পন্দনী সংস্থা থাকে, তার বাধ পরিবর্তনীয় ; গ্রিড্‌-বর্তনীতে যুক্ত স্পন্দক পাত নিজেই এক অনুনাদী বর্তনী (চিত্র 20.9*b*)। দুই বর্তনীর মধ্যে যোজন (coupling) হয় দুই তড়িৎ-দ্বারের মধ্যবর্তী ধারণ-ক্ষমতার (inter-electrode capacitance)

মারফতে। প্লেট-বর্তনীর কম্পাংক স্ফটিক-পাতের কম্পাংকের চেয়ে সামান্য বেশী রাখা হয়। এই বর্তনীতে আবেশী প্রতিক্রিয়তা স্পন্দনবিস্তার নিয়ন্ত্রণ করে।

চিত্র 20.9(*a*)
মিলার-এর বর্তনী

চিত্র 20.9(*b*)—কোয়াৎ´জ-পাতের (Q) প্রতিসম বর্তনী

কোয়াৎ´জ-পাতের প্রতিসম বর্তনী ঃ বিদ্যুৎ-বর্তনীর দৃষ্টিকোণ থেকে কোয়াৎ´জ-পাত স্পন্দককে একটি LCR সংস্থার সমান্তরালে C_1 ধারকযুক্ত অনুনাদী বর্তনী ব'লে ধরা চলে। পাতের স্পন্দনে, কার্যকরী ভরের প্রতিসম রাশি স্বাবেশ L, পাতের স্থিতিস্থাপকতার তথা কার্যকর যান্ত্রিক নমনীয়তার বৈদ্যুতিক প্রতিসম রাশি-ধারিতা C, আর স্পন্দনে বাধাদানকারী ঘর্ষণ-বলের প্রতিসম রাশি বৈদ্যুতিক রোধ R [চিত্র 20.9(*b*)]। স্ফটিকের স্থির অবস্থায় তার দুই ধাতুপাতের মধ্যবর্তী বৈদ্যুতিক ধারিতার মান C_1 থাকে। পাতের দৈর্ঘ্য (l), প্রস্থ (w) এবং বেধের (t) ওপর LCR-এর মান নির্ভর করে ; যথা—বেধ-স্পন্দনে, $L = 118t^3/wt$ হেনরী, $C = 0.003wl/t$ pf এবং $C_1 = 0.4wl/t$ pf। 20.9 চিত্রের বর্তনীর দুটি অনুনাদী স্পন্দনাংক থাকে ; তারা যথাক্রমে

$$\omega_s^2 = LC \quad \text{এবং} \quad w_p^2 = (C_1 + C)/L$$

এখানে $\omega_s/2\pi$ হচ্ছে LCR শাখায় শ্রেণীসজ্জার অনুনাদ-কম্পাংক আর $\omega_p/2\pi$ স্ফটিক-পাতের অনুনাদী কম্পাংক।

২০-৭. স্বনোত্তর তরঙ্গ-সন্ধানী ঃ

সাধারণ সব শব্দসন্ধানী দিয়েই এই কাজ সম্ভব। তাই হ্রাণুতরঙ্গ উৎপন্ন ক'রে (১) সুবেদী শিখা ও ঘূরন্ত আয়না, (২) Kundt-নল এবং

(৩) তপ্ত-তার মাইক্রোফোনের সাহায্যে, বায়ুতে এদের অস্তিত্ব সন্ধান করা যায়; অবশ্যই এসব ক্ষেত্রে স্বনোত্তর তরঙ্গ, তুলনায় স্বল্পকম্পাংক হতে হবে। স্থাণুতরঙ্গের সরণ-নিস্পন্দবিন্দুতে চাপভেদ চরমমাত্রা হয়—তাই (১) সুবেদী শিখা অস্থির হয়; (২) নির্দেশী গুঁড়া স্তূপীকৃত হয়; আর (৩) তারের রোধ বদলায়। শেষের ব্যবস্থাটি তরলে 100 কিলোচক্র/সে পর্যন্ত কার্যকরী।

কম্পাংক আরও বেশী হলে চৌম্বক ও বিদ্যুত-তাঁতির অপনেয় ক্রিয়া ব্যবহার করা হয়। সন্ধানী স্ফটিক-পাতের ওপর স্বনোত্তর তরঙ্গ পড়লে উৎপন্ন প্রত্যাবর্তী চাপভেদ, পাতে সমকম্পাংকে স্পন্দন ঘটায়; তাতে প্রত্যাবর্তী পীড়ন এবং ফলে বৈদ্যুতিক অক্ষের দুই প্রান্তীয় তলে প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ জাগে। পাতে অনুনাদী স্পন্দন ঘটাতে পারলে, স্পন্দনবিস্তার ও তাতে উৎপন্ন বিভবভেদ চরমমাত্রায় হয়। এই বিভবভেদের সুবিধামতো বিবর্ধন ঘটিয়ে ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখের সাহায্যে যেকোন কম্পাংকের সহজেই সন্ধান পাওয়া সম্ভব হয়েছে। স্ফটিক-পাতের স্পন্দন অনুনাদী না হলে আবির্ভূত বিভবভেদ যৎসামান্য হয় এবং কোন নির্দিষ্ট চাপে সমমানে থাকে। তখন সন্ধানীর সাড়া কম্পাংক-নিরপেক্ষ হয়—ঘটনাটি বিশেষ সুবিধাজনক; তাতে দরকারমতো প্রাবল্যও মাপা সম্ভব হয়। এক্ষেত্রে আধুনিক উচ্চ-প্রসার (high gain) ইলেকট্রনীয় বিবর্ধকের সহায়তায় স্বন- এবং স্বনোত্তর বিস্তীর্ণ কম্পাংকপাল্লা জুড়ে চাপজ-বৈদ্যুত স্পন্দনের সন্ধান করা সম্ভবপর হয়েছে। আবার সন্ধানীপাতের বেধ আপতিত তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় ছোট হলে, তার সাড়াও আপতনের দিক্-নিরপেক্ষ হয়; বড় হলে, প্রেরকের মতো গ্রাহকও দিক্-ধর্মী (directional) হয়। বেরিয়াম টাইটানেটের তৈরী ছোট ছোট ফাঁপা বেলন সাগর-জলের তলায় বিস্তীর্ণ পাল্লা জুড়ে দিক্-নিরপেক্ষ জলৌন স্বনোত্তর তরঙ্গ-সন্ধানী হিসাবে ব্যবহার হচ্ছে। এদের ব্যাস (d), দৈর্ঘ্য (l) এবং বেধ (t) বরাবর তিনরকম স্পন্দনই সম্ভব এবং সেই সেই রীতিতে মূল কম্পাংকও আলাদা আলাদা হয়—যথাক্রমে $c/\pi d$, $c/2l$ এবং $c/2t$; 4 সেমি লম্বা, 4 সেমি গড় ব্যাস এবং 0.3 সেমি প্রাচীর-বেধের এইজাতীয় বেলনে মূল কম্পাংক যথাক্রমে 36, 57 এবং 870 কিলোচক্র/সে এবং যথাযথ কম্পাংক-পাল্লায় সেটি তিন রীতির স্পন্দন অনুযায়ী সেই সেই কম্পাংকের তরঙ্গের সন্ধান করতে পারে।

চৌম্বক-তাতিক্রিয় বেলনাকার স্বনোত্তর তরঙ্গ-সন্ধানীরও ব্যবহার হচ্ছে। এক্ষেত্রে কোমলায়িত (annealed) নিকেলের আংটা ওপর-ওপর সাজিয়ে বেলনটি তৈরী হয়; তাকে স্পন্দিত করে একটি অন্তহীন, স্বল্পবেধ, সলেনয়েড কুণ্ডলী। বেলনটির ব্যাস বরাবর স্পন্দন ঘটে এবং কম্পাংক, নিকেলে তরঙ্গ-বেগ ও বলয়ের গড় পরিধি এই দুয়ের অনুপাতের কাছাকাছি। বেলনটিকে গোড়ায় চুম্বকিত করা থাকে। আপতিত উচ্চকম্পাংক-তরঙ্গের দরুন চাপভেদে, ব্যাস বরাবর প্রত্যাবর্তী পীড়ন ঘটে এবং ফলে চুম্বকিত অবস্থারও অদলবদল হতে থাকে। উৎপন্ন ফ্লাক্স-ভেদ বিদ্যুৎকুণ্ডলীতে প্রত্যাবর্তী প্রবাহের আবেশ ঘটায় এবং সেইভাবেই তরঙ্গের সন্ধান হয়।

দুই শ্রেণীর সন্ধানীই মুখ্যত অনুনাদী কম্পাংকের কাছাকাছি সংকীর্ণ পাল্লায় বিশেষরকম কার্যকরী; মনে রাখা উচিত যে, অনুনাদী কম্পাংক এবং মাধ্যমের Q-মানের অনুপাত n_0/Q হলে, $n_0 \pm n_0/Q$ পাল্লায় সাড়া—চরম সাড়ার অর্ধেকের বেশী হয়। এখন জলের Q-মান 10, বায়ুর 20,000; সুতরাং জলে অনুনাদ-খরতা কম, প্রতিবেদন-পাল্লা বিস্তৃত। কিন্তু বায়ু-মাধ্যমে প্রতিবেদন-পাল্লা খুবই সংকীর্ণ, অনুনাদী কম্পাংকের খুব কাছাকাছিই থাকে। তবে উচ্চপ্রসার বিবর্ধকের কল্যাণে দুই শ্রেণীর সন্ধানীতেই প্রতিবেদন-পাল্লা যথেষ্ট প্রসারিত করা গেছে।

২০-৮. চাপজ-বৈদ্যুত স্ফটিকগুলির তুলনামূলক আলোচনা:

উচ্চকম্পাংকের স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপাদনে এবং সন্ধানে এরা অপরিহার্য। সেই উদ্দেশ্যে এদের যেসব কাঙ্ক্ষিত গুণ থাকা দরকার, সেগুলি হ'ল—(১) বেশী কার্যকর তাতি-গুণাংক (strain constant) বা প্রযুক্ত পীড়ন এবং উৎপন্ন বিভবভেদের অনুপাত (pressure-voltage gradient), (২) যান্ত্রিক দৃঢ়তা, (৩) উষ্ণতা বা পারিপার্শ্বিকের পরিবর্তনে ভৌত-ধর্মের নিরপেক্ষতা, (৪) বিশুদ্ধতা, লভ্যতা, মূল্য প্রভৃতি। এইসব সর্ত সন্তোষজনকভাবে পূরণ করতে অল্পসংখ্যক স্ফটিকই পারে—তারা হ'ল কোয়ার্ৎজ, রোচেল লবণ (sodium potassium tartarate) এবং ট্যুরম্যালিন। উচ্চকম্পাংকে শাব্দ-রূপান্তর ঘটাতে এবং ইলেকট্রনীয় বর্তনীতে কম্পাংক-স্থিতি বজায় রাখতে এদের বহুল ব্যবহার। কোয়ার্ৎজ গুঁড়ো ক'রে 250°সে উষ্ণতায় এবং 300 পাঃ/বর্গ ইঞ্চি চাপে ক্ষারীয় দ্রবণে গুলে কম উষ্ণতায়, 100 গ্রাম ওজনের

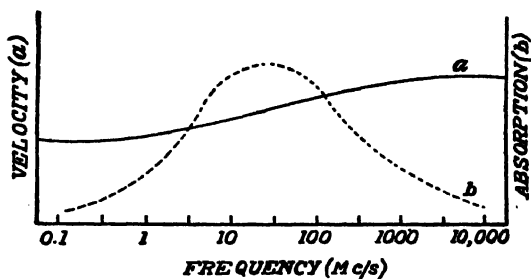
সুগঠিত, স্ফটিক-স্বচ্ছ এবং প্রয়োজনীয় বৈদ্যুতিক ও আলোকীয় ধর্মযুক্ত কৃত্রিম কোয়াৎ´জ-স্ফটিক তৈরী করা সম্ভব হয়েছে।

মাইক্রোফোন, হাইড্রোফোন, নানা জলৌন শব্দপ্রেরক ও গ্রাহকের জন্য চাপবেদী স্ফটিকের ক্রমবর্ধমান চাহিদা মেটাতে নিয়ন্ত্রিত-উষ্ণতায় দ্রবণ থেকে নানা স্ফটিক কৃত্রিমভাবে উৎপাদিত হচ্ছে; এদের মধ্যে *ADP*, *KDP*, *DKT*, *LH*, *EDT* (ethylene diamene tartarate) প্রভৃতি প্রধান। নানারকম বহু-স্ফটিক সেরামিক পদার্থেও চাপবৈদ্যুৎ-ধর্মের স্ফুরণ ঘটানো সম্ভব। **বেরিয়াম টাইটানেট** 120°সে উষ্ণতায় শক্তিশালী বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রে (20 KV/cm) যদি রাখা যায়, তাহলে প্র-বৈদ্যুত পদার্থের মতো এতেও বৈদ্যুতিক মেরুধর্মের প্রকাশ ঘটে; এবং তখন এই পদার্থ একটি চাপবৈদ্যুত স্ফটিকের মতো আচরণ করে। এতে সামান্য পরিমাণে সীসা বা ক্যালসিয়ামের টাইটানেট-যৌগ মেশালে, এর চাপবৈদ্যুত ধর্মের স্ফুরণ আরও স্পষ্ট হয়। তা ছাড়া **লেড জিরকনেট, লেড নিওবেট** প্রভৃতি সেরামিকেও এই ধর্ম থাকে। মেরুধর্ম-আরোপী ক্ষেত্রের অভিমুখই এদের বৈদ্যুতিক অক্ষ। এইজাতীয় সেরামিকের সন্ধান গবেষণাগারে নিরলসভাবেই চলেছে। তবে এদের বৈদ্যুত-যান্ত্রিক আচরণ কিছুটা অনিশ্চিত; সেই আচরণ—অপদ্রব্যগুলির প্রকৃতি এবং অনুপাতের ওপর এবং প্রযুক্ত উষ্ণতা ও বৈদ্যুতিক ক্ষেত্রের ওপর নির্ভর করে। কিন্তু একক স্ফটিকের তুলনায় এদের অনেকগুলি অন্যান্য সুবিধা রয়েছে—এদের ইচ্ছামতো আকার দেওয়া সম্ভব (পাত, নল, দণ্ড, অবতল বা উত্তল, বেলনীয় ইত্যাদি); (২) এদের বৈদ্যুতিক অক্ষের অভিমুখ সম্পূর্ণরকম নিয়ন্ত্রণাধীন এবং (৩) চাপ-বিদ্যুতাংকের মান খুবই বেশী।

অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের ক্ষেত্রে X-ছাঁটের কোয়াৎ´জ-স্ফটিকের তড়িৎ-গুণাংক 2.3×10^{-10} সেমি/ভোল্ট, 45°- X-ছাঁটের রোচেল লবণের ক্ষেত্রে 275×10^{-10}, 45°- Z-ছাঁটের *ADP* স্ফটিকে 24×10^{-10} ও বেরিয়াম টাইটানেটে 56×10^{-10} সেমি/ভোল্ট। কোয়াৎ´জের ভৌত ও রাসায়নিক ধর্মগুলির সুনিশ্চিতি, কাঠিন্য, উষ্ণতার স্বল্পপ্রভাব প্রভৃতি অনেক বেশী হওয়ায়, এর তড়িৎ-গুণাংক সামান্য হওয়া সত্ত্বেও, কোয়াৎ´জ সর্বাধিক ব্যবহৃত চাপবৈদ্যুত উপাদান। বেরিয়াম টাইটানেট তুলনায় সস্তা এবং তার বৈদ্যুতিক উৎপাদও অনেক বেশী। অল্প কম্পাংকে উচ্চ ক্ষমতা উৎপাদনে, কোয়াৎ´জ যেখানে অচল, এই উপাদানটি সেখানে সক্ষম।

উষ্ণতা ও জলীয় বাষ্প, রোচেল লবণের আচরণে বিশেষ তারতম্য ঘটায়। *ADP* ও *LH* স্ফটিক জলে দ্রবণীয় ব'লে তাদের রক্ষা করতে আস্তরণ দিতে হয়। সব-ক'টি স্ফটিকের মধ্যে কেবলমাত্র *LH* স্ফটিকই আয়তন-বিকৃতিতে সঠিকভাবে সাড়া দেয়। তাই জলের তলায় শব্দ-সন্ধানে এদের ব্যবহার বেশী হচ্ছে। আজকাল সেরামিক উপাদানগুলি প্রাকৃতিক ও কৃত্রিম স্ফটিকদের স্থানচ্যুত ক'রে ফেলছে।

২০-৯. গ্যাসীয় ও তরল মাধ্যমে স্বনোত্তর তরঙ্গ :

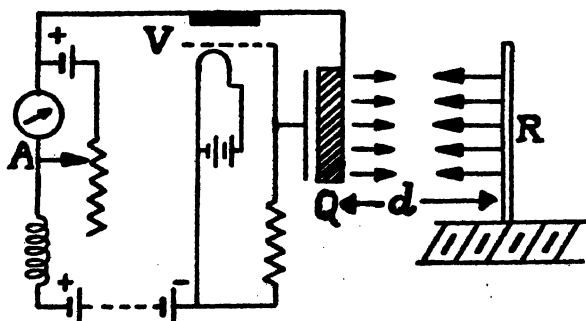
স্বনোত্তর তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছোট হওয়ায় আলোক-তরঙ্গের ব্যাপ্তির ভিন্ন ভিন্ন ঘটনা, যথা—বিবর্তন, ব্যতিচার, শোষণ, বিচ্ছুরণ প্রভৃতি যে শব্দতরঙ্গেও ঘটে, তা সহজেই দেখানো যায়। স্বনতরঙ্গের ক্ষেত্রে এই ধর্মগুলির আলোচনা আগে

চিত্র 20.10—স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগ ও শোষণের সঙ্গে কম্পাংকের সম্পর্ক

৯ অধ্যায়ে আমরা করেছি। তবে সেইজাতীয় তরঙ্গে শোষণ এবং বিচ্ছুরণের ঘটনার প্রমাণ মেলে না—মেলে স্বনোত্তর তরঙ্গের বেলায়। কোন মাধ্যমে স্বন-তরঙ্গের শোষণ নির্ভর করে কম্পাংকের ওপর (চিত্র 19.7), আর বিচ্ছুরণ, বেগের ওপর ; বেগ কিন্তু মোটামুটিভাবে কম্পাংক-নিরপেক্ষ (20.10 চিত্রে এই তিন রাশির মধ্যে সম্পর্ক চিহ্নিত হয়েছে), তাই গ্যাসে স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগ মাপার নির্ভরযোগ্য পন্থা চাই। স্বল্পবিস্তার স্বনতরঙ্গের বেগ, স্বল্পবিস্তার স্বল্পকম্পাংক স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগের সমান। সুতরাং স্বনোত্তর বেগের মাপনকে স্বনবেগ মাপার আর-এক পন্থা ব'লে ধরা যায়।

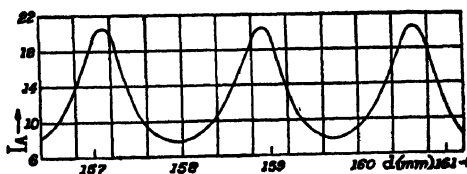
স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগ-মাপন : এক্ষেত্রে সরাসরি তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) মেপে, তাকে স্বনকের কম্পাংক (n) দিয়ে গুণ ক'রে কুণ্ড-নল পরীক্ষণের

মতোই তরঙ্গবেগ বার করা হয়। স্থাণু-তরঙ্গ পদ্ধতিতে বা ঝর্ঝরে বিবর্তন ঘটিয়ে তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় করা যায়।

ক. স্বনোত্তর ব্যতিচারমান (Ultrasonic interferometer) : বর্তমানে চাপবৈদ্যুত, স্ফটিক এবং চৌম্বক-তাঁতি-নিয়ন্ত্রিত রডের স্পন্দন-কম্পাংক নির্ভুলভাবে মাপা সম্ভব হওয়ায়, স্পন্দক এবং কোন সমতল প্রতিফলকের মধ্যে স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন ক'রে গ্যাসে ও তরলে তরঙ্গবেগের মান সুনিশ্চিতভাবে নির্ণয় করা সম্ভব হয়েছে। এই উদ্দেশ্যে পিয়ার্স-এর উদ্ভাবিত ব্যতিচারমান যন্ত্র বিশেষভাবে উল্লেখযোগ্য।

যন্ত্রটির কার্যনীতি সরল। স্পন্দক থেকে সমতলীয় স্বনোত্তর তরঙ্গমালা বিকিরিত হয়; কিন্তু দূরবর্তী মসৃণ এবং অভিলম্ব এক প্রতিফলকে প্রতিহত হয়ে তারা ফিরে আসে এবং আপতিত তরঙ্গশ্রেণীর ওপর সমাপতিত হয়ে স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি ঘটায়। স্বনকের ওপর প্রতিফলিত তরঙ্গের প্রতিক্রিয়া মেপে নিস্পন্দ-বিচলন বিন্দুগুলির অবস্থান নির্ণয় করা যায়। প্রতিফলকটিকে এগিয়ে পেছিয়ে এই অবস্থানগুলি সনাক্ত করা হয়—পরপর দুই নিস্পন্দ-বিন্দুর মধ্যে ব্যবধান $\lambda/2$; আবার প্রতিফলককে না সরিয়ে একটি ক্ষুদ্র তপ্ত-তার সন্ধানী, স্পন্দক এবং প্রতিফলকের মধ্যে সরিয়ে সরিয়ে নিস্পন্দ-বিন্দুগুলির অবস্থান-নির্দেশ সম্ভব। উৎস-স্পন্দকটি চাপবৈদ্যুত স্ফটিক বা চৌম্বক-তীত-নিয়ন্ত্রিত রড্‌ হতে পারে।

চিত্র 20.11(*a*)—স্বনোত্তর ব্যতিচারমানের কার্যনীতি
(কোষের চিহ্ন ভুল বসেছে)

20.11(*a*) চিত্রে একটি স্ফটিক ব্যতিচারমান যন্ত্র দেখানো হয়েছে। এখানে Q স্পন্দকপাত, সামনের এক ছিদ্র দিয়ে তার প্রস্থ-স্পন্দিত তরঙ্গমালা বিকিরিত

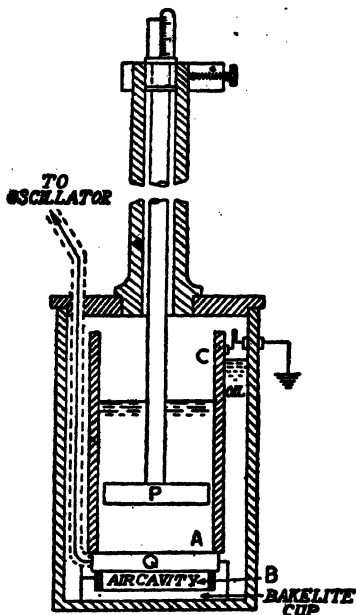
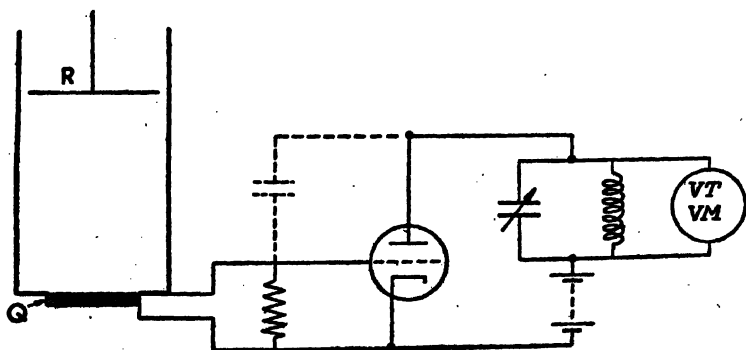
হয়। স্পন্দকটি ইলেকট্রনীয় বর্তনীর সাহায্যে স্বনোত্তর কম্পাংকে স্পন্দিত করা হয়। Q-এর মাপ তরঙ্গদৈর্ঘ্যের তুলনায় অনেক বড়, ফলে সমতলীয় তরঙ্গ উৎপন্ন হয় ; তারা R প্রতিফলকে প্রতিহত হয়ে ফিরে আসে। Q এবং R পরস্পর সমান্তরাল এবং সমাক্ষ হলে, তাদের মধ্যবর্তী জায়গায় স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি হবে ; সূক্ষ্মভাবে প্যাঁচ-কাটা একটি স্ক্রু সাহায্যে R-কে এগোনো-পেছোনো যায়। প্রতিফলিত তরঙ্গ Q-এর ওপর প'ড়ে নিজের দশানুযায়ী এর স্পন্দনে সহায়তা করে বা বাধা দেয় ; মিলি-অ্যামিটারের (A) পাঠ তদনুযায়ী বদ্‌লাতে থাকে। সূক্ষ্ম মাপনের দরকারে A-তে একটি মাইক্রো-অ্যামিটার বসে এবং তার সমান্তরালে কোষ ও পরিবর্তনীয় রোধ-সম্বলিত পোটেনশিয়োমিটার ব্যবস্থা থাকে ; দরকারমতো রোধ বদল ক'রে A-তে বিদ্যুৎপ্রবাহ প্রশমিত

চিত্র 20.11(b)—স্বনোত্তর ব্যতিচারমান-সৃষ্ট স্থাণুতরঙ্গমালা

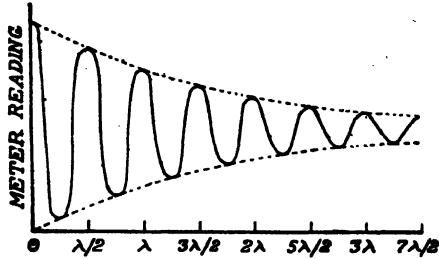
করা যায়। 20.11(b) চিত্রে QR-এর ব্যবধানের সঙ্গে A-র পাঠ দেখানো হয়েছে। R-এর অবস্থান অনুযায়ী পাঠ ক্রমান্বয়ে বাড়ে কমে ; লক্ষণীয় যে, A-র চরম পাঠের সাড়াগুলি অবম পাঠের তুলনায় খরতর। R-এর যে যে অবস্থানে প্রতিফলিত তরঙ্গগুলি সমদশায় Q-এতে ফেরে, তদনুযায়ী স্পন্দকের কম্পন সহায়তা পায়, ফলে A-র পাঠ অবম মান হবে ; কেননা বর্তনীতে প্রবাহের দিষ্ট অংশটুকুই, A-তে নির্দেশিত হয়। বিপরীত অবস্থায় প্রত্যাবর্তী ধারা অবম মান, সুতরাং A-র পাঠ চরম ; তখন বর্তনীতে প্রতিক্রিয়তা শূন্য এবং রোধ চরম, কারণ বায়ুর বিকিরণ-বাধ অন্য মাধ্যমের তুলনায় কম।

যন্ত্রে (চিত্র 20.11a) অর্জিত সূক্ষ্মতা যথেষ্ট, 3000 ভাগে মাত্র 1 ভাগ। R 1150 তরঙ্গদৈর্ঘ্য দূরে থাকলেও A-তে প্রতিফলিত তরঙ্গের প্রতিক্রিয়া ধরা পড়ে। চরম সাড়ার অবস্থান মাত্র 0.05 মিমি মধ্যে পাওয়া সম্ভব এবং ক্রমান্বয়ে শতাধিক এইরকম অবস্থান, সহজেই গোনা যায়। স্ফটিক-পাতের স্পন্দন-কম্পাংক আবার, সুবেদী তরঙ্গমাপক যন্ত্র (wave-meter) দিয়ে নির্ণয় করা হয়।

পিয়ার্সের পরীক্ষালব্ধ সিদ্ধান্তগুলি হ'ল—(১) প্রতিফলিত তরঙ্গের ক্রিয়ায় স্ফটিক-স্পন্দকের কম্পাংক বদ্‌লায় না; (২) খোলা হাওয়ায় 0°C উষ্ণতায় এবং 1 কিলোচক্র/সে কম্পাংকে তরঙ্গবেগ 331.94 মি/সে, 50 কিলোচক্রে 332.47 এবং 1.5 মেগাচক্রে 331.64 মি/সে; অর্থাৎ কম্পাংকের সঙ্গে বেগ বদ্‌লায়, অর্থাৎ বিচ্ছুরণ ঘটে; (৩) 80% আর্দ্রতাতেও বেগ অতি সামান্যই বদ্‌লায়; (৪) CO_2 গ্যাসে কম্পাংকের সঙ্গে বেগ অল্প অল্প বাড়তে থাকে, অর্থাৎ বিচ্ছুরণ বাড়তে থাকে, এবং খুব বেশী কম্পাংকে শোষণ তথা ক্ষীণীভবন দেখা দেয়। পাশের যন্ত্রটি তরলের জন্য।

চিত্র 20.11(*c*)—স্বনোত্তর ব্যতিচারমান (তরল)

স্বনোত্তর তরঙ্গের বিচ্ছুরণ ও শোষণ: পিয়ার্স-এর পদ্ধতিকে আরও সুবেদী ক'রে গ্যাসীয় মাধ্যমে এই দুই ঘটনা সম্বন্ধে বহু পরীক্ষা-নিরীক্ষা হয়েছে। তিনি দেখিয়েছিলেন যে, 20 এবং 200 কিলোচক্রে CO_2-র

চিত্র 20.12(*a*)—স্বনোত্তর গ্রাহকের প্রতিক্রিয়া মাপার বিকল্প ব্যবস্থা

শোষণ বায়ুর তুলনায় যথাক্রমে চার গুণ ও আশী গুণ, 1000 কিলোচক্রে তার মধ্যে দিয়ে শব্দ যায়ই না। অন্যান্য গবেষকেরা প্রতিফলকের বদলে অভিন্ন

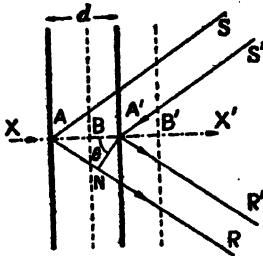
কম্পাংকের আর একটি কোয়াৎ´জ-পাতের ওপরে উৎপন্ন তরঙ্গমালা পড়তে দিয়ে একটি ভাল্‌ভ-ভোল্টমিটারে (VTVM) তাদের প্রতিক্রিয়া মাপেন।

চিত্র 20.12(*b*)—গ্রাহক-প্রতিক্রিয়ার লেখচিত্র

20.12(*a*) চিত্রে গ্রাহক-পাতের সজ্জা ও বর্তনী আর 20.12(*b*) চিত্রে দুই কোয়াৎ´জ-পাতের দূরত্বের (QR) সঙ্গে মাপকের পাঠে পরিবর্তন দেখানো হয়েছে ; ভোল্টমিটারের পাঠে ক্রমিক চরম মানগুলির বিস্তারের ক্রমহ্রাস থেকে মাধ্যমে শোষণের আন্দাজ মেলে। H_2, N_2O প্রভৃতি গ্যাসে শোষণ যথেষ্ট, O_2 ও SO_2-তে অনেক কম এবং আর্গন গ্যাসে নগণ্য পাওয়া গেছে। 20.15 চিত্রে কয়েকটি গ্যাসে কম্পাংকের সঙ্গে শোষণ-গুণাংকের সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। 20.10 চিত্রে *a* রেখাটি প্রকৃতপক্ষে বিচ্ছুরণ দেখাচ্ছে। চাপ এবং উষ্ণতার প্রভাবেও সাধারণভাবে বিচ্ছুরণের মান অর্থাৎ বেগ বদ্‌লায়।

স্বনোত্তর ব্যতিচারমান যন্ত্রের সাহায্যে একই পদ্ধতিতে তরলেও স্বনোত্তর তরঙ্গের শোষণ এবং বিচ্ছুরণ মাপা যায়। অল্পশোষী তরলে 1 মেগাচক্র কম্পাংকে তরঙ্গদৈর্ঘ্যের মাপে অর্জিত সূক্ষ্মতা 30,000 ভাগে 1 ভাগ, অধিকশোষী তরঙ্গে 5000 ভাগে 1 ভাগ। সরণবিস্তারের চরম ও অবম মানের অনুপাত দিয়ে শোষণ মাপা হয়। 0.3 থেকে 80 মেগাচক্র পাল্লায় এই যন্ত্র [চিত্র 20.11(*c*)] ব্যবহার করা যায়। নিচের দিকে 0.02 মেগাচক্র পর্যন্ত অনুরণন পদ্ধতিতে এবং ওপরের দিকে 200 মেগাচক্র পর্যন্ত স্পন্দশব্দ পদ্ধতিতে এইসব মাপ নেওয়া সম্ভব।

খ. শাব্দ-ঝর্ঝর পদ্ধতি : ১৬.৬(গ) অনুচ্ছেদে শাব্দ-ঝর্ঝর বা গ্রেটিং-এর ব্যবহার-পদ্ধতির কথা বলা হয়েছে। (১) প্যালেলোগোস নামে এক বিজ্ঞানী এই ব্যবস্থায় প্রথম, স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগ মাপেন (১৯২৩)। তিনি দিষ্ট বিদ্যুৎ-ধারার ওপর উচ্চ কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী প্রবাহের সমাপতন ঘটিয়ে 0.2

থেকে 2 মেগাচক্র পর্যন্ত কম্পাংকের স্বনোত্তর তরঙ্গ উৎপন্ন করেছিলেন এবং সমান্তরাল তারশ্রেণীর ওপর সেই সমতলীয় তরঙ্গ ফেলে তাদের বিবর্তন-কোণ মেপে তরঙ্গদৈর্ঘ্য 0.17 থেকে 0.017 সেমি পর্যন্ত পেয়েছিলেন। তাদের যথাযথ কম্পাংক দিয়ে গুণ ক'রে 0°সে উষ্ণতায় বায়ুতে স্বনোত্তর তরঙ্গের গতিবেগ 335 মি/সে পাওয়া গিয়েছিল।

(২) **ডিবাই-সীয়ার্স পদ্ধতি:** ব্রিলে৺া নামে এক বিজ্ঞানী ধারণা করেন (১৯২১) যে, তরলের বা কঠিনের মধ্যে শক্তিশালী শব্দতরঙ্গ পাঠালে উৎপন্ন ঘনীভূত ও তনুভূত স্তরগুলি সমকোণ-গামী আলোর পক্ষে এক সমতলীয় ঝর্ঝর বা গ্রেটিং-এর কাজ করবে ; কেননা খুব উচ্চ কম্পাংকে এই স্তরগুলির আলোক-প্রতিসরাংক আলাদা আলাদা হয়ে যায়। আলোর এই বিবর্তন, স্ফটিকের মধ্যে সমান্তর এবং সমান্তরাল অণুর সারি থেকে ব্র্যাগ-প্রস্তাবিত রঞ্জনরশ্মির বিবর্তনের তুলনীয় ঘটনা। শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্যই এখানে ঝর্ঝর-অবকাশ (grating space) ; কেননা তরঙ্গ সচল হলেও তরলের পরিবর্তিত ঘনত্বের স্তরগুলি সমান্তরই থাকবে। তাহলে m-তম্ ক্রমে (order) λ দৈর্ঘ্যের আলোক-তরঙ্গের বিবর্তন-কোণ হবে

চিত্র 20.13—ডিবাই-সীয়ার্স নীতি

$$m\lambda = 2d \sin\theta = 2(c/n) \sin\theta$$

এখানে n শব্দ-কম্পাংক এবং c শব্দবেগ।

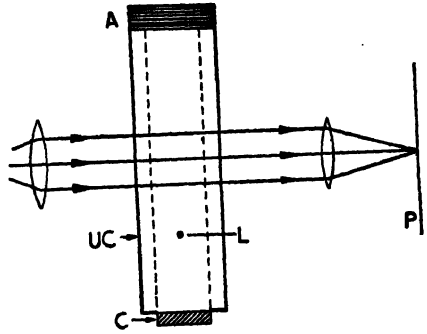
প্রকৃতক্ষেত্রে, স্বন-বিবর্তনের ব্যাপার ব্রিলে৺া-র প্রস্তাবিত নিয়মিত প্রতিফলন-তত্ত্বের মতো অত সরল নয়। তবে র‍্যালে-র প্রস্তাবিত, তরঙ্গায়িত (corrugated) তলে সমতলীয় তরঙ্গের বিবর্তন-তত্ত্ব অনুসরণ ক'রে রমন এবং নগেন্দ্রনাথ, লম্ব ও তির্যক্ আপতন দুয়ের ক্ষেত্রেই স্বন-বিবর্তনের সম্পূর্ণ ব্যাখ্যা দিয়েছেন। তাঁদের তত্ত্বে ভিন্ন ভিন্ন কর্মীদের নিরীক্ষিত সব তথ্যেরই সুষ্ঠু ব্যাখ্যা মিলেছে। তাঁরা বলেছেন—

(১) চৌকো আকারের মাধ্যমে দুই তলের সমকোণে শব্দতরঙ্গ যদি তার গতিপথের সমকোণে বিকীরিত সমতলীয় আলোক-তরঙ্গকে ($v = \nu\lambda$) অতিক্রম ক'রে যায়, তাহলে $\sin^{-1}(m\lambda/d)$ কোণে আলোর বিবর্তন হয় এবং m-ক্রমের আলোর কম্পাংক ($\nu - mn$) হবে ; n এখানে স্বন-কম্পাংক।

(২) শব্দতরঙ্গমালা স্থাণু হলেও বিবর্তন-কোণ একই হবে এবং অযুগ্ম ক্রমের বিবর্তিত আলোর কম্পাংক $[\nu \pm (2r+1)n]$, আর যুগ্ম ক্রমে $(\nu \pm 2rn)$ হবে।

(৩) বিবর্তিত ক্রমগুলিতে আলোর প্রাবল্য, বেসেল-অপেক্ষকের সহায়তায় সমাধানীয় অবকল সমীকরণ থেকে পাওয়া যায়।

(৪) সচল এবং স্থাণু শব্দতরঙ্গ-সৃষ্ট তরলের পরিবর্তিত ঘনত্বের স্তর ভেদ ক'রে যেতে আলোর কম্পাংকের সামান্য ডপ্‌লার-সরণ হয়।

এইসব তথ্য কাজে লাগিয়ে ডিবাই ও সীয়ার্স প্রথম শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্য এবং তার থেকে বেগ মাপার পন্থা উদ্‌ভাবন করেন (১৯২৫)। 20.14 চিত্রে এই ব্যবস্থার নক্সা দেখানো হয়েছে। C এখানে X-ছাটের কোয়াৎ´জ-স্ফটিক স্বনক। বেশ লম্বা একটি চৌকা আধারে পরীক্ষণীয় তরল থাকে। আধারটিকে স্বনোত্তর কোষ (UC) বলা চলে। কোষের অপরপ্রান্তে শোষক পদার্থে (A) শব্দতরঙ্গ শোষিত হয়ে যায়; তাতে স্থাণুতরঙ্গ গঠিত হবার সম্ভাবনা থাকে না। তরলের মধ্য দিয়ে সমকোণে একরঙা আলোর সমান্তরাল কিরণ যেতে পারে। আলোক-সচেতন প্লেটে (P) রন্ধ্রের প্রতিবিম্ব ও বিবর্তিত প্রতিবিম্বগুলি মুদ্রিত হয়।

চিত্র 20.14—ডিবাই-সীয়ার্সের স্বনোত্তর শাব্দ-ঝঝর্র

শোষণ মাপতে স্বনোত্তর কিরণমালার ভিন্ন ভিন্ন জায়গায়, ফোটো-প্লেটের বদলে আলোক-মাপনী বা ফোটোমিটার যন্ত্র, নির্দিষ্ট একটি বিবর্তিত আলোককিরণ বরাবর বসানো যায়। সাদা আলো ব্যবহার করলে শাব্দ-ক্ষেত্রের রঙীন ছবি পাওয়া যাবে। ছবিতে একই রঙের আলো তরলের যে অঞ্চল জুড়ে থাকে সেখানে শাব্দপ্রাবল্য সমান।

এই পন্থায় শব্দবেগ মাপায় 0.1% পর্যন্ত সূক্ষ্মতা অর্জন করা সম্ভব। আজকাল বিপুলবিস্তারে, শব্দতরঙ্গের যে আকার-বিকৃতি ঘটে, তাও এই আলোকীয় পদ্ধতিতে অনুসন্ধান করা হচ্ছে।

২০-১০. স্বনোত্তর তরঙ্গে বিচ্ছুরণ ও শোষণ:

আলোক-তরঙ্গের বিচ্ছুরণ ও শোষণ পরিচিত ঘটনা। শোষণেরই অন্যতম পরিণাম বিচ্ছুরণ। স্বচ্ছ মাধ্যমে বিভিন্ন দৈর্ঘ্যের তথা কম্পাংকের আলো, ভিন্ন ভিন্ন গতিতে চলে ব'লে আলোর বিচ্ছুরণ হয়। স্বনতরঙ্গে এই ঘটনা হয় না। কিন্তু আগের অনুচ্ছেদে আমরা দেখেছি যে, স্বনোত্তর তরঙ্গে কম্পাংকভেদে বেগের পরিবর্তন (অর্থাৎ বিচ্ছুরণ) এবং মাধ্যমভেদে ও কম্পাংকভেদে কম-বেশী শোষণ হয়। সুতরাং শব্দপ্রসারের সার্থক ব্যাখ্যায় শোষণপ্রক্রিয়া অন্তর্ভুক্ত হওয়া উচিত। শোষণ ও বিচ্ছুরণ, শব্দের তরঙ্গধর্মের এবং আলোর সঙ্গে তার সমধর্মিতার আরও সমর্থন যোগায়।

শোষণ-প্রক্রিয়ার তাত্ত্বিক ব্যাখ্যা: কোন স্বচ্ছ মাধ্যমের মধ্যে আলোর শোষণ ল্যাম্বার্ট-এর সূত্র মেনে চলে। সমতলীয় শব্দ তথা সংকোচন তরঙ্গও অনুরূপভাবেই শোষিত হয়। মাধ্যমের শোষণাংক α ধরলে,

$$p = p_o e^{-\alpha x} \text{ বা } \alpha = \frac{1}{x} \ln (p_o/p) \qquad (২০\text{-}১০.১)$$

সমীকরণ দিয়ে x দূরত্ব অতিক্রম করতে, শাব্দচাপের আনুপাতিক হ্রাস মেলে। স্টোকস এবং কারশফ এই হ্রাস বা তরঙ্গ-তনূকরণের জন্যে মাধ্যমের সান্দ্রতা (v) এবং তাপপরিবাহিতাকে (h) দায়ী করেন। ঐ দুটি গুণাংক যথাক্রমে η এবং κ ধরলে, তাঁদের বিশ্লেষণ অনুযায়ী

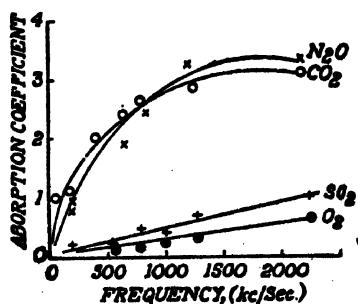
$$\alpha = \alpha_v + \alpha_h = \frac{8\pi^2 n^2 \eta}{3\rho c^2} + \frac{\kappa}{C_v}\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right)\frac{2\pi^2 n^2}{c^2} \qquad (২০\text{-}১০.২)$$

এখানে n তরঙ্গ-কম্পাংক, ρ মাধ্যম ঘনত্ব, c তরঙ্গবেগ, $\gamma = C_p/C_v$; গ্যাসে $\alpha_h \simeq \alpha_v/3$, কিন্তু তরলের ক্ষেত্রে প্রায় নগণ্য। এক-পরমাণু গ্যাসে এই বিশ্লেষণ মোটামুটি কার্যকর।

কিন্তু বহু-পারমাণবিক গ্যাসে বা গ্যাসের ও তরলের ক্রান্তিক (critical) অবস্থার কাছাকাছি শোষণ আর এই তত্ত্বানুসারী নয়। এই বৈলক্ষণ্য ব্যাখ্যা করতে শোষণের তৃতীয় পদ্ধতি আলোচ্য—**শ্লথন-শোষণ**। আগে (৬-১১ঘ) আমরা শ্লথন-দোলনের দরুন তরঙ্গবিস্তারের অবক্ষয়ের সম্পর্কে ইঙ্গিত করেছি। অণুগুলির গতিশক্তি তাদের পরমাণুর কম্পনশক্তিতে রূপান্তরিত হতে সময় লাগে —সঙ্গে সঙ্গে হয় না। এই অবকাশকেই শ্লথন-কাল বলে। তাকে আবার শাব্দ-কোয়ান্টামের গড় স্থায়িত্বকালও বলা হয়। বিজ্ঞানী হাবার্ড-এর ভাষায়, শ্লথন-কাল আর পারমাণবিক স্পন্দনের পর্যায়কাল যখনই তুলনীয় মান হয়,

তখনই যেন অণুগুলিতে স্পন্দনদাঢ'্য বা স্পন্দনে বাধা বেড়ে যায়। ফলে অণুগতি থেকে স্পন্দনে, শক্তির রূপান্তরে কিছুটা শক্তিহানি ঘটে। শক্তির এই অপচয়ের, তথা শোষণের বহিঃপ্রকাশকে **শ্লথন-শোষণ** বলে। তার ফলে দুই আপেক্ষিক তাপের অনুপাত γ-র মান বদ্‌লে যায়। স্বনতরঙ্গে কম্পাংক কম, সুতরাং পর্যায়কাল বেশী; তার তুলনায় শক্তিবিনিময়কাল নগণ্য থাকে। কিন্তু স্বনোত্তর কম্পাংকে পর্যায়কাল অনেক কম, সুতরাং বিনিময়ের জন্য প্রয়োজনীয় কালক্ষেপ আর নগণ্য থাকে না—ফলে চরম চাপভেদ কমে যায় এবং শোষণ ঘটে।

যখনই অণুর কোন আচরণ সময়ের সঙ্গে দ্রুতহারে বদ্‌লায় তখন সেই ধর্মের মান তার আদি মানের $1/e$ অংশে পৌঁছতে যত সময় লাগে তাকে **শ্লথন-কাল** এবং সংশ্লিষ্ট কম্পাংককে শ্লথন-কম্পাংক বলে; এই কম্পাংকে শোষণ সবচেয়ে বেশী। উচ্চতর কম্পাংকে শক্তি-বিনিময় হতে পর্যাপ্ত সময় মেলে না ব'লেই শোষণ কমে যায়। এক-পরমাণু গ্যাসের অণুতে পারমাণবিক স্পন্দনের প্রশ্নই নেই, সুতরাং শ্লথনজাতীয় শোষণ হয় না এবং পরীক্ষালব্ধ ফল শোষণের পূর্ববর্তী তত্ত্বসম্মতই হয়। দ্বি-পারমাণবিক অণুর সরণ এবং আবর্তন হয়, আবার পরমাণু দুটির সংযোগী রেখা বরাবর স্পন্দনও হয়। প্রথম দুই গতিকে বহিরাণবিক (অণুর বাইরে) এবং তৃতীয়টিকে আন্তরাণবিক (অণুর ভেতরে) **গতীয় স্বাতন্ত্র্যমাত্রা** বলে। শ্লথন বলতে বহিরাণবিক থেকে আন্তরাণবিক শক্তি-বিনিময়ের ঘটনা বোঝায়। সুতরাং এইজাতীয় অণুতে দু'রকম শোষণই হয়। বহু-পারমাণবিক গ্যাসে শ্লথনের প্রভাব স্বভাবতই ঢের বেশী এবং শ্লথন-কম্পাংকও যথেষ্টই বেশী। তাদের পরমাণুগুলির স্পন্দনস্বাতন্ত্র্যমাত্রাই (degrees of freedom of vibrations) এজন্য দায়ী। স্বনোত্তর তরঙ্গবাহী মাধ্যমে শোষণাংক মাপার পদ্ধতি আগেই আলোচিত হয়েছে।

CO_2, C_2H_2, N_2O প্রভৃতি গ্যাসে এবং বেঞ্জিন এবং ক্লোরোফর্ম প্রভৃতি তরলে শোষণ অস্বাভাবিক রকম বেশী হতে দেখা গেছে। এর সঠিক ব্যাখ্যা এখনও মেলেনি। ভাববার কথা যে, যে যে পদার্থে আলোর বিক্ষেপণ বেশী হয়, তারাই স্বনোত্তর তরঙ্গ শোষণ করে অস্বাভাবিক রকম বেশী হারে—দুই

চিত্র 20.15—কয়েকটি গ্যাসে স্বনোত্তর তরঙ্গের শোষণ

প্রক্রিয়ার মধ্যে হয়তো কোন সম্পর্ক আছে। সাধারণভাবে বলতে গেলে কয়েকটি মাত্র এক-পরমাণু গ্যাস এবং খুব বেশী সান্দ্র-তরল ছাড়া সব তরলেই, শোষণ পূর্বকালীন তত্ত্বসম্মত শোষণের তুলনায় ঢের বেশী ; যেমন—জল বা কোহলে শোষণ দুই থেকে চারগুণ বেশী, অনেক তরলে 100 থেকে হাজারগুণ।

কঠিন পদার্থে স্বনোত্তর তরঙ্গের শোষণ বহু কারণে হয়—বহু-স্ফটিক কঠিনে, একক স্ফটিক কর্তৃক বিক্ষেপণ, এক স্ফটিক থেকে পরেরটিতে তাপের পরিবহণ, আকৃতির বৈশিষ্ট্য, প্রচুম্বকীয় ও প্রবৈদ্যুতিক ধর্ম, নিম্ন উষ্ণতায় ধাতুর মুক্ত ইলেকট্রনগুলিতে স্পন্দনশক্তির সঞ্চার, প্রভৃতি।

এইরকম নানা জটিলতার দরুন পদার্থে উচ্চ কম্পাংকের সংকোচন তরঙ্গের প্রসার-ঘটনার সর্বত্র প্রযোজ্য তত্ত্ব-নির্ধারণ, আজও সম্ভব হয়নি। শ্লথন-প্রক্রিয়া—জটিল অণুতে স্পন্দনরীতি বুঝতে আমাদের সাহায্য করে। তা ছাড়াও তরল এবং কঠিন পদার্থে স্বনোত্তর তরঙ্গের প্রসার তাদের স্থিতিস্থাপক আচরণেও অনেক আলোকপাত করে।

২০-১১. স্বনোত্তর তরঙ্গের ব্যবহারিক প্রয়োগ :

মৌলিক গবেষণা এবং ব্যবহারিক প্রয়োগে এই শ্রেণীর তরঙ্গগুলির সংখ্যা ও সম্ভাবনা সীমাহীন। পদার্থবিদ্, রসায়নী, জীববিদ্যাবিশারদ, প্রযুক্তিবিদ্, অপরাধ-বিশেষজ্ঞ, মনস্তাত্ত্বিক, সৌধস্বনকার, চিকিৎসক প্রভৃতি আপাত-নিঃসম্পর্ক ও বিচিত্র জীবিকার কর্মীরা স্বনোত্তর তরঙ্গের নিত্য নতুন ফল ও প্রয়োগ আবিষ্কার করছেন। তাদের মধ্যে অতি সামান্য কয়েকটি নিচে তালিকাভুক্ত করা হ'ল।

স্বল্পকম্পাংক, স্বনোত্তর তরঙ্গের আচরণ মোটামুটি স্বল্পবিস্তার স্বনতরঙ্গের মতোই। সুতরাং শব্দের তরঙ্গধর্মের বিশ্বাসযোগ্য প্রতিষ্ঠা এদের সাহায্যে করা সহজ, কেননা তরঙ্গদৈর্ঘ্য ছোট হওয়ায় অল্প জায়গাতেই পরীক্ষণ চালানো সম্ভব। এ সম্পর্কে সবচেয়ে উল্লেখযোগ্য প্রয়োগ এদের গতিবেগ-নির্ণয় ; আমরা সে-পদ্ধতি আগে আলোচনা করেছি। শব্দবেগ স্বল্পকম্পাংক স্বল্পবিস্তার স্বনোত্তর তরঙ্গবেগের সমান। বেগের মানের ওপর ভিত্তি ক'রে এদের সাহায্যে সমুদ্রের গভীরতা নির্ণয়, ডুবো-জাহাজের অবস্থিতি নির্ণয়, SONAR পদ্ধতিতে বিকল্প কাজ চালানো—আমরা পরের অধ্যায়ে আলোচনা ক'রবো। মৌলিক গবেষণার ক্ষেত্রে কঠিনের স্থিতিস্থাপকতা-ধর্মের বিশ্লেষণ এবং বহুপারমাণবিক গ্যাসের আণবিক গঠন এবং আপেক্ষিক তাপের অনুপাতের

পরিবর্তন সন্ধানে স্বনোত্তর তরঙ্গের সাফল্য বিশেষ উল্লেখযোগ্য। এ সম্পর্কে ইঙ্গিত আগের অনুচ্ছেদে দেওয়া হয়েছে।

ক. যান্ত্রিক ক্রিয়া ও ব্যবহারিক প্রয়োগ: স্বনোত্তর কম্পাংকে স্পন্দমান এবং দ্রুত ঘূর্ণায়মান কাচের বিঁধ (drill) কাচ, ইস্পাত, কঠিনতম ধাতু, এমন-কি হীরের মধ্যেও সহজেই চৌকো, ত্রিকোণ, গোল বা সাঁপিল গর্ত কাটতে পারে। এই স্বনোত্তর বিঁধ দিয়ে এখন দাঁতে ফুটো পর্যন্ত করা হচ্ছে।

দেখা গেছে যে, 60 কিলোচক্রের স্বনোত্তর তরঙ্গ—মোটরগাড়ি, ক্যামেরা, এবং নানারকমের ধাতুর যন্ত্র থেকে ধুলো-ময়লা, তেলকালি, ধাতুচূর্ণ, এমন-কি বয়লারের শল্ক (scales) পর্যন্ত ঝেড়ে ফেলায় বিশেষ কার্যকর। স্বনোত্তর ধাবন (washing) যন্ত্র মাত্র 40 ওয়াট ক্ষমতা-প্রয়োগে কয়েক মিনিটের মধ্যেই কোন ক্ষতি না ক'রে গরম জামাকাপড় থেকে ধুলো-ময়লা ঝেড়ে ফেলতে সক্ষম; অতি দ্রুত স্পন্দনশীল তল থেকে ধুলো-বালি ইত্যাদি স্থিতিজড়তার দরুন ঝরে পড়ে যায় (দ্রুতগতিতে গাছ নাড়িয়ে পাকা ফল বা শুকনো পাতা পাড়ার মতো)। সম্প্রতি স্বনোত্তর কম্পন ঘটিয়ে ইনজেকশনের সূচ, ছোট ঘড়ির সূক্ষ্ম যন্ত্রাংশ, বল-বেয়ারিং, ছোট ট্রানজিস্টর যন্ত্রসংস্থা, ফিল্টার-কাগজ, চাপমাপী গেজ প্রভৃতি দ্রুত পরিষ্কার করার জন্য যন্ত্র বেরিয়েছে। এইসব ক্ষেত্রে স্বনোত্তর তরঙ্গের যথেষ্ট শক্তি থাকা দরকার।

খ. স্বনোত্তর তরঙ্গে চাপভেদ এবং তার ব্যবহারিক প্রয়োগ: তরলে স্বনোত্তর তরঙ্গ যথেষ্ট চাপভেদের সৃষ্টি করতে পারে। তেলে-ডোবানো স্বনোত্তর স্পন্দকে মাত্র 2W ক্ষমতা প্রয়োগ করলে তার উপরিতলে এতখানি চাপ উৎপন্ন হয় যে, তেল ফোয়ারার আকারে উঠে ছড়িয়ে পড়ে; শুধু তাই নয়, তেলের জটিল অণুগুলি ভেঙে গিয়ে সূক্ষ্ম অবদ্রবে (emulsion) পরিণত হয়। দুই অমিশ্রিত তরলের (যেমন—তেল আর জল বা জল আর পারদ) সীমাতলে স্বনোত্তর তরঙ্গ পাঠালে, তারা প্রবল চাপে মিলে-মিশে সমসত্ত্ব অবদ্রবে পরিণত হয়।

কোন মাধ্যমে স্বনতরঙ্গে উদ্ভূত চাপভেদ $p^2 = 2I\rho c$; জলের বিশিষ্ট বাধ ρc, বায়ুর তুলনায় প্রায় 3500 গুণ বেশী। সুতরাং একই তীব্রতা-মানে (I) জলে শাব্দচাপভেদ বায়ু-সাপেক্ষে অনেক বেশী। স্বনোত্তর তরঙ্গ তরলে দ্রুত পরিবর্তনশীল চাপভেদ উৎপন্ন করে। এই তরঙ্গ যথেষ্ট জোরালো হলে চাপহ্রাস এত বেশী হতে পারে যে, তরল ছিন্নবিচ্ছিন্ন হয়ে গিয়ে ছোট ছোট গহ্বরের সৃষ্টি হতে পারে। গহ্বরগুলি সাধারণত মিশ্রিত ধূলিকণা বা

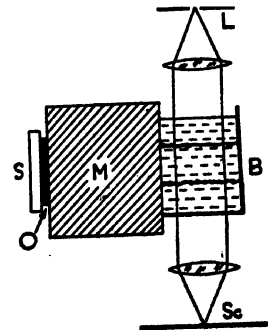
তরল-মধ্যস্থ গ্যাসকে কেন্দ্র ক'রে গড়ে ওঠে। এই বুদ্‌বুদগুলির মধ্যে প্রবল প্রত্যাবর্তী চাপের ক্রিয়ায় তরল বাষ্পীভূত হতে থাকে। পরে যখন চাপবৃদ্ধি ঘটে, বুদ্‌বুদগুলি ফেটে যায়। স্বনোত্তর তরঙ্গের ক্রিয়ায় তরলের মধ্যে বুদ্‌বুদের উৎপত্তি ও নিষ্পত্তির ঘটনাকে **গহ্বরণ প্রক্রিয়া** (cavitation) বলে। রাসায়নিক ও জীববিদ্যায় অবদ্রবণ ও গহ্বরণের নানারকম প্রয়োগ সম্ভব হয়েছে।

গ. রাসায়নিক প্রয়োগ: নানা রাসায়নিক বিক্রিয়ায় স্বনোত্তর তরঙ্গ—বিশ্লেষক, সংশ্লেষক এবং অনুঘটকের কাজ করে। জোরালো স্বনোত্তর তরঙ্গের ক্রিয়ায় গ্যাসে কঠিন কণাসমূহ (ধোঁয়া বা মেঘ) বা তরলে নিলম্বিত (suspended) বা অবদ্রাব (emulsion) কঠিন কণাগুলি (যথাক্রমে aerosols এবং ,hydrosols), হয় বিচ্ছিন্ন হয়, না হয় জমাট বাঁধে। আগের অনুচ্ছেদে তেলে-জলে বা পারদে-জলে অবদ্রব হওয়ার কথা বলা হয়েছে। ধোঁয়ায় বা কুয়াশায় স্বনোত্তর তরঙ্গের ক্রিয়ায় ধূলিকণা বা জলকণাগুলি জমাট বেঁধে ভারী হয়ে নিচে পড়ে যায়। পশ্চিমে, শিল্পনগরীগুলিতে বায়ু বা চিমনিতে ধোঁয়ার উৎপাত এই পদ্ধতিতে কমানোর চেষ্টা চলেছে।

আবার, তরলে কলয়েড অণুগুলি বা জটিল অণু, স্বনোত্তর তরঙ্গের প্রবল প্রত্যাবর্তী চাপের ক্রিয়ায় ভেঙে যায়। এইভাবে $HgCl_2$, H_2O, শ্বেতসার প্রভৃতি অণু ভাঙা হয়েছে; KI দ্রব থেকে আয়োডিন, H_2S দ্রব থেকে গন্ধক জারিত হয়ে বেরিয়ে আসে; লাল মিথাইল ভায়োলেট বিবর্ণ হয়ে যায়। এই রাসায়নিক পরিবর্তনগুলি গহ্বরণ-প্রক্রিয়ার দরুন ঘটে ব'লে অনুমিত হয়। বৈদ্যুতিক কোষের মধ্যে স্বনোত্তর তরঙ্গ পাঠালে, খুব ছোট ধাতুকণাগুলি তরলে ছড়িয়ে থাকে আর বড় কণাগুলি ক্যাথোডে আটকে না থেকে তলায় পড়ে যায়। এইভাবে তরলে নিলম্বিত নানা মাপের ধাতুকণিকার কলয়েড দ্রব তৈরী করা সম্ভব হয়েছে। এইরকম ধাতুকণিকার নিলম্বন বা অবদ্রব সৃষ্টি করতে অপেক্ষাকৃত নিম্ন কম্পাংকের স্বনোত্তর তরঙ্গের দরকার। কোন ধাতু বা সংকর ধাতুর দ্রব থেকে ছোট ছোট এবং সমান মাপের স্ফটিক জমাতে দ্রবের মধ্যে স্বনোত্তর কম্পাংকে বিক্ষোভ ঘটানো বিশেষ কার্যকর পন্থা। অ্যালুমিনিয়ম ও ম্যাগনেসিয়ামের ক্ষেত্রে এই ঘটনা বিশেষভাবে পরিস্ফুট হয়।

ঘ. জীববিদ্যা ও চিকিৎসাক্ষেত্রে প্রয়োগ: তরলে জোরালো স্বনোত্তর তরঙ্গ পাঠালে কণিকাগুলির দ্রুত স্পন্দন হয় এবং প্রচুর তাপোদ্ভব হয়। তাতে এককোষী প্রাণী বা জীবাণু মরে যায়। এইভাবে দুধ বা

পানীয় জল খুব অল্পসময়ে জীবাণুমুক্ত করা যায়। ব্যাঙাচি বা ছোট ছোট মাছ পর্যন্ত এই প্রক্রিয়ায় মরে যায়। জীবাণুবিদ্যায় এর অসংখ্যরকম প্রয়োগ —রক্ত-আমাশা, অ্যানথ্র্যাক্স, স্ট্যাফাইলোকক্কাস প্রভৃতি রোগজীবাণু সম্পূর্ণ বিনষ্ট হয়; রক্তকণিকা খুব সহজে ভেঙে গিয়ে হিমোগ্লোবিন-মুক্ত হয়, গাঁজানোর জন্য দায়ী ঈস্ট-কোষের বিভাজন বন্ধ হয়ে যায়, শরীরের ভেতরে কোথাও স্থানীয় রক্তক্ষরণ বন্ধ করা যায়।

বর্তমানে সোভিয়েত ও মার্কিনী চিকিৎসকেরা এদের দ্রুত স্পন্দনকে স্নিগ্ধকর সংবাহনের (massage) কাজে লাগিয়ে বাতশূল (Neuralgia), গেঁটেবাত (Arthritis), পেশীযন্ত্রণা বা আভ্যন্তরীণ থেঁৎলে-যাওয়া প্রভৃতির যন্ত্রণার লাঘব, এমন-কি নিরাময় পর্যন্ত করেছেন। ক্ষতের মধ্যে সংকুচিত পেশী ও কলা, এমন-কি বিকৃত আঙুল পর্যন্ত তাতি-মুক্ত ক'রে সোজা করা গেছে। বৈদ্যুতিক শক্ এবং মনস্তাত্ত্বিক চিকিৎসা ব্যর্থ হওয়ার পর মস্তিষ্কে স্বনোত্তর তরঙ্গ পাঠিয়ে উন্মাদ রোগীকে সুস্থ করা হয়েছে। এই তরঙ্গের সাহায্যে ত্রিমাত্রিক স্বনোত্তর চিত্রলেখের (three dimensional ultrasonography) সাহায্যে মস্তিষ্কে, এমন-কি চোখের মধ্যে, দুষ্টব্রণের নির্ভুল স্থাননির্দেশ সম্ভব হয়েছে; আবার তার মধ্যেও অতি ক্ষুদ্র ক্যান্সারের সন্ধান দোলন-লিখের সহায়তায় করা হয়েছে। মস্তিষ্কের মধ্যে মেগাচক্র কম্পাংকের ক্ষণস্বনোত্তর তরঙ্গ পাঠিয়ে, তার ভেতরে ভিন্ন ভিন্ন স্তর থেকে রাডার-প্রক্রিয়াতে প্রতিফলন, দোলন-লিখে প্রয়োগ ক'রে মস্তিষ্কের শাব্দচিত্র নেওয়া হয়। এতে রক্তবাহী ধমনীর স্পন্দন পর্যন্ত পরিষ্কার দেখা যায়; অভিসারী স্বনোত্তর কিরণ রক্তকণিকা জমিয়ে দিয়ে রক্তপাত বন্ধ করতে পারে ব'লে রক্তপাতহীন শল্যচিকিৎসায় এখন তার বিশেষ আদর। তাই মস্তিষ্কে শল্যচিকিৎসা করতে এর ব্যবহার ক্রমেই বাড়ছে। এইভাবে বিচিত্র প্রয়োগ প্রায়ই উদ্ভাবিত হচ্ছে।

চিত্র 20.16—কঠিনে ত্রুটির সন্ধান

বন্ধ ঘরে স্বনোত্তর স্থাণুতরঙ্গের মধ্যে কোন সচল পদার্থ যে বিক্ষোভ সৃষ্টি করে, তাকে কাজে লাগিয়ে ব্যাংকের নিরাপদ ভল্টে চোর-ধরা সম্ভব হয়েছে। ডিবাই-সীয়ার্স পদ্ধতি কাজে লাগিয়ে কঠিন পদার্থে ত্রুটি (flaw) বা বিষমসত্ত্বতার

সন্ধান ওপরের প্রক্রিয়াগুলিরই কঠিন অজৈব পদার্থে সার্থক প্রয়োগ। সোকোলোফ-উদ্ভাবিত এই ব্যবস্থায় (চিত্র 20.16) S স্বনোত্তর কোয়াৎ´জ-স্পন্দক, M পরীক্ষাধীন অস্বচ্ছ কঠিন পদার্থ ; তাদের মধ্যে O গাঢ়-সংযোগী তৈলস্তর ; B স্বনোত্তর কোষ ; Sc পর্দায় L আলোক-প্রভবের বর্ণালী পড়ে। M-কে আলোক-কিরণের সমান্তরালে সরালে যদি তাতে ত্রুটি থাকে, তবে পর্দায় রেখা-বর্ণালীর প্রাবল্য বা খরতা বদ্‌লাবে।

প্রশ্নমালা

১। স্বনোত্তর তরঙ্গ কাকে বলে? কি কি উপায়ে তাদের উৎপন্ন করা সম্ভব? স্বন এবং স্বনোত্তর তরঙ্গের মাধ্যমের মধ্যে সম্প্রচারে কি কি তফাৎ লক্ষ্য করা যায়? এই প্রভেদের উৎপত্তির তাত্ত্বিক কারণ আলোচনা কর।

২। স্বনোত্তর তরঙ্গের প্রধান প্রধান ব্যবহারিক প্রয়োগ আলোচনা কর। বিশুদ্ধ বিজ্ঞানের গবেষণায় স্বনোত্তর তরঙ্গের গুরুত্ব আলোচনা কর।

৩। চৌম্বক-তাঁতি কাকে বলে? প্রচৌম্বক রডে অনুদৈর্ঘ্য সংনমন তরঙ্গবেগের এবং মূল কম্পাংকের মান প্রতিষ্ঠা কর। চুম্বকিত করায় রডের মূল কম্পাংকের কতখানি বদল হয়?

৪। চৌম্বক-তাঁতি-চালিত স্বনোত্তর স্পন্দক বর্ণনা কর। তার ক্রিয়াপদ্ধতি ব্যাখ্যা কর। কি কম্পাংক-পাল্লায় এর ব্যবহার হয়?, বেশী কম্পাংকে হয় না কেন? স্পন্দকে কোন্ প্রচৌম্বক পদার্থের ব্যবহার হয় এবং কেন? অন্য পদার্থের অসুবিধা কি?

৫। চাপজ-বৈদ্যুত এবং বৈদ্যুতিক ঘটনাগুলি কি কি এবং তাদের মধ্যে সম্পর্কই বা কি? কোয়াৎ´জ-পাতে চাপ দিলে যে বৈদ্যুতিক বিভবভেদ উৎপন্ন হয়, তা প্রমাণ কর। প্রত্যাবর্তী বিভবভেদ প্রয়োগে উৎপন্ন সংনমনের বেগ, নিমেষসরণ মান এবং মূল কম্পাংক নির্ণয় কর। পাতের স্পন্দনরীতি কি কি? তার মধ্যে কোন্‌টিতে সুবিধা বেশী এবং কি কি?

৬। স্বনোত্তর স্পন্দক বা সন্ধানী হিসাবে ব্যবহৃত চাপ-বৈদ্যুত উপাদান-গুলির তুলনামূলক আলোচনা কর। ব্যবহৃত পাতগুলি স্ফটিক থেকে নির্দিষ্টভাবে কাটতে হয় কেন? কতকগুলি সাধারণ ছাঁটের বর্ণনা কর।

৭। ডিবাই-সীয়ার্স পদ্ধতি কি? মৌল গবেষণা এবং প্রায়োগিক ক্ষেত্রে তার গুরুত্ব সম্পর্কে আলোচনা কর।

৮। শব্দের তরঙ্গধর্ম-প্রতিষ্ঠায় স্বনোত্তর তরঙ্গের কি অবদান?

৯। স্বনোত্তর ব্যতিচারমান-যন্ত্র সম্পর্কে পূর্ণাঙ্গ আলোচনা কর।

২১

শব্দের বেগ-সংক্রান্ত পরীক্ষা-নিরীক্ষা

(Determinations relating to Velocity of Sound)

২১-১. সূচনা :

বইয়ের শেষ অধ্যায়ে শব্দের বেগ-নির্ণয়ের নানা রীতিনীতি আলোচিত হবে। এ সম্পর্কে তাত্ত্বিক আলোচনা আগে ৬ অধ্যায়ে হয়েছে। বেগ-নির্ণয়ের পরীক্ষা-নিরীক্ষাগুলি মোটামুটি দুই শ্রেণীতে পড়ে—(১) খোলা জায়গায় প্রসারিত-ক্রম (large-scale) পদ্ধতি, আর (২) সীমিত জায়গায় সংকীর্ণ-ক্রম পদ্ধতি। মোটামুটিভাবে প্রথম শ্রেণীতে শব্দসংকেতপ্রেরণ (signal method), আর দ্বিতীয় শ্রেণীর পরীক্ষণে স্থাণুতরঙ্গ প্রথায় কাজ করা হয়। মনে রাখা দরকার যে, দুই প্রথায় নির্ণীত শব্দবেগের মান সমান হয় না—এই প্রভেদের তাত্ত্বিক ব্যাখ্যাও আছে।

বাস্তব মাধ্যমের স্থিতিস্থাপক গুণাংক E এবং সাম্য-অবস্থায় ঘনত্ব ρ হলে, তাতে শব্দের বেগ $c=\sqrt{E/\rho}$; কঠিন, তরল ও গ্যাসীয় মাধ্যমে এই রাশিগুলির মান ভিন্ন ভিন্ন হওয়ায়, তিনজাতীয় মাধ্যমে শব্দবেগ আলাদা আলাদা হয়। আমরা বায়ুমাধ্যমে শব্দের বেগ-নির্ণয় পদ্ধতিগুলির ওপরই জোর দেব ; অন্যগুলির আলোচনা সংক্ষেপেই হবে। সামরিক ও তথ্যানুসন্ধানের কারণে সমুদ্রজলে এবং ভূতাত্ত্বিক, ভূকম্পন, খনিজপদার্থের অনুসন্ধান প্রভৃতি সম্পর্কিত গবেষণায় বিস্তারিত কঠিন মাধ্যমে শব্দের গতিবেগ-নির্ণয় বিশেষ গুরুত্বপূর্ণ। ৭ এবং ৯ অধ্যায়ে এ-বিষয়ে কিছু কিছু আলোচনা হয়েছে।

মুক্তবায়ুতে শব্দের বেগ সহজেই সরাসরিভাবে বার করা যায়। কিন্তু, নানা কারণে বায়ুমাধ্যম সমসত্ত্ব থাকে না। সুতরাং নির্ণীত শব্দবেগ নির্ভুল হয় না, আর ত্রুটিগুলির মান নির্ধারণ বা নিরসন সম্ভব নয়। এই কারণে নলের মধ্যে বায়ুমাধ্যম সীমিত ক'রে বেগ-নির্ণয়ের পদ্ধতি চালু হয়েছে। এক্ষেত্রে ত্রুটিগুলি মোটামুটি নিয়ন্ত্রণাধীন, কিন্তু সীমিতকরণের ফলেই আবার

নূতন নূতন ত্রুটি আমদানি হয়। দু'ধরনের পরীক্ষণ-পদ্ধতিই আমরা বিশদভাবে আলোচনা ক'রবো। তার সঙ্গে আরও কিছু শব্দবেগ-নির্ভর পরীক্ষা—যেমন, জাহাজের অবস্থান নির্ণয়, প্রতিধ্বনি দিয়ে দূরত্ব বা জলের গভীরতা নির্ণয়, বিস্ফোরণের দূরত্ব ও ঘটনাস্থল নির্ণয় প্রভৃতি এই আলোচনার অঙ্গীভূত হবে।

২৯-২. মুক্তবায়ুতে শব্দের বেগ-নির্ণয়ঃ

খোলা জায়গায় কোন এক জায়গায় কামান বা বন্দুক ছুঁড়ে শব্দসংকেত করা হয়। অনেক দূরের পর্যবেক্ষক শব্দসৃষ্টি ও তার কানে শব্দ পৌঁছানো এই দুয়ের মধ্যে কালান্তর নির্ণয় করেন। শব্দের উৎস এবং পর্যবেক্ষকের অবস্থান এই দুয়ের মধ্যে দূরত্ব জেনে সরাসরি বেগ বার করা হয়। বর্তমানেও অনুসৃত নীতি একই, খালি প্রভেদ শব্দগ্রহণ এবং দূরত্ব-নির্ণয়ে উত্তরোত্তর উন্নত প্রযুক্তি-কৌশলে।

গ্যালিলিও এই নীতির প্রবর্তক। এই রীতিতে বহু পরীক্ষা-নিরীক্ষার মধ্যে সপ্তদশ ও অষ্টাদশ শতাব্দীতে ফ্রান্সে মার্সেন গ্যাসেণ্ডি এবং আরাগো, ইতালিতে বোরেলিও, ভিভিয়ানি এবং ইংলণ্ডে ডেনহাম-এর সযত্নকৃত পরীক্ষাগুলি উল্লেখযোগ্য। বেশী দূরত্ব, উন্নততর সময়মাপক দোলক এবং ব্যক্তিগত সন্ধান-ত্রুটি সম্পর্কে অবহিত থেকে ডেনহাম শব্দের বেগের মান পান (১৭০৪) 348 মি/সে। এইজাতীয় সব পরীক্ষাতেই কয়েকটি নিরীক্ষণ-ত্রুটি থেকে যেতে বাধ্য—

(১) শব্দ উৎপাদন ও গ্রহণের মধ্যে কালান্তর-নির্ণয়ে ব্যক্তিগত বা গ্রাহকযন্ত্রের সাড়া দেওয়ায় বিলম্ব ;

(২) লক্ষ্য এবং পর্যবেক্ষণ স্থানগুলির মধ্যে বাতাস অর্থাৎ বায়ুপ্রবাহজনিত ত্রুটি ;

(৩) উষ্ণতা, আর্দ্রতা এবং অঙ্গারাম্লের (CO_2) উপস্থিতিতে বায়ু-মাধ্যমের স্থানীয় বিষমসত্ত্বতা ; এবং

(৪) কামান-গর্জনে উদ্ভূত প্রবল শব্দের অস্বাভাবিক এবং দ্রুত পরিবর্তনশীল গতিবেগ।

বৈদ্যুতিক উপায়ে শব্দপ্রেরণ ও গ্রহণের ব্যবস্থা ক'রে প্রথমে রেনো (১৮৬৪) ব্যক্তিগত ত্রুটি নিরসনের চেষ্টা করেন। কিন্তু যন্ত্রের জড়তা-জনিত ত্রুটি এই ত্রুটির মতোই। তবে যান্ত্রিক ত্রুটি স্থিরমান,

ব্যক্তিগত ত্রুটির মতো অনিয়মিত নয়। দুইটি ভিন্ন ভিন্ন দূরত্বে গ্রাহকযন্ত্র রেখে রেনো এই ত্রুটি অপনীত করেন। বস্কা শব্দের সমাপতন ঘটিয়ে (১৮৫৩) এই ত্রুটি নিরসন করেন।

বায়ুপ্রবাহ-জনিত ত্রুটি নিরসনের জন্য ফরাসী বিজ্ঞানীরা ব্যতিহার (reciprocal) পর্যবেক্ষণপ্রণালী গ্রহণ করেন (১৭৩৮)—শব্দ উৎপাদন এবং গ্রহণ দুই পর্যবেক্ষণ স্থলেই পাল্টাপাল্টিভাবে করা হয়। কিন্তু আরাগো দেখান (১৮২২) যে, বাতাসের মাত্রা ও দিক্‌ এতই অনিশ্চিত যে, ব্যতিহার পর্যবেক্ষণ যুগপৎ না হলে এই ত্রুটি সম্পূর্ণভাবে অপনীত হয় না। তবে শব্দবেগ বায়ুবেগের তুলনায় অনেক বেশী ব'লে যুগপৎ পর্যবেক্ষণ না হলেও যে ত্রুটি আসে, তা দ্বিতীয় ক্রমের, সুতরাং উপেক্ষণীয়।

মুক্তবায়ুতে **বিষমসত্ত্বতা** অর্থাৎ স্থানীয় ঘনত্বভেদ থাকবেই। সে-সম্পর্কে তাত্ত্বিক আলোচনা এবং সংশোধনের উপায় ৬ অধ্যায়ে বলা হয়েছে। কিন্তু অভ্রান্ত সংশোধন সম্ভব নয়। মাধ্যমে সীমিত না হলে এই ভ্রান্তি এড়ানো যায় না। শেষ ত্রুটিটি নিরসন করতে মাঝারি প্রাবল্যের স্বনক দরকার। সেক্ষেত্রেও সীমিত মাধ্যমের প্রয়োজন।

ব্যক্তিগত ত্রুটি নিরসন ঃ সংকেত-প্রথায় শব্দবেগ-নির্ণয়ে পর্যবেক্ষক সংকেত দেখেন ও শব্দ শোনেন। দেখা এবং শোনার উপলব্ধি এবং তদনুসারে ঘড়ি চালানো এবং বন্ধ করা কখনই যুগপৎ হয় না। উপলব্ধি ও ক্রিয়ার মধ্যে যে কালভেদ, তাকে ব্যক্তিগত ত্রুটি বলে। এর মান অনিয়ত ব'লে সঠিকভাবে নির্ণেয় নয়; অথচ পরীক্ষণ-ভ্রান্তিতে এর অবদানই সর্বাধিক। কাজেই নানা ভাবে এই ত্রুটি নিরসনের চেষ্টা হয়েছে। কয়েকটি উল্লেখযোগ্য প্রচেষ্টার কথা নিচে বলা হচ্ছে—

ক. স্টোন কর্তৃক ব্যক্তিভ্রম-নির্ণয় (১৮৭২)ঃ এই পদ্ধতিতে পর্যবেক্ষক ও কামানের মধ্যে দূরত্ব এবং নিরীক্ষিত সময় যথাক্রমে L এবং T ধরা যাক। এবারে পর্যবেক্ষক থেকে এমন জানা দূরত্বে (l) বন্দুক ছোঁড়া হয় যাতে নিকটের বন্দুক আর দূরের কামানের শব্দ সমপ্রাবল্যের মনে হয়। ব্যক্তিগত ভ্রম t আর বন্দুকের শব্দবেগের আসন্ন মান c_1 ধরলে, পর্যবেক্ষকের নিরীক্ষায় কালান্তর (l/c_1+t) হবে। তা থেকে t বার করা যায়। তখন প্রকৃত শব্দবেগ $c=L/(T-t)$।

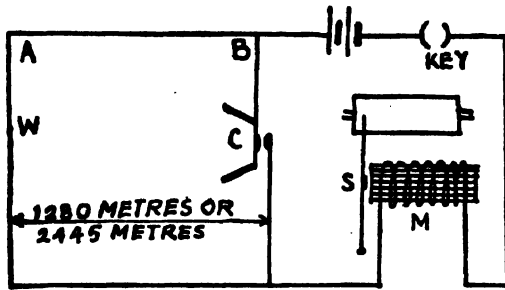
খ. বস্কা-উদ্ভাবিত সমাপতন-পদ্ধতিঃ এই পদ্ধতিতে দুটি স্বনক A এবং B নির্দিষ্ট কালান্তরে যুগপৎ ক্ষণশব্দ উৎপন্ন করতে থাকে;

অদের মধ্যে A এক জায়গায় রাখা থাকে, আর B-কে নিয়ে পর্যবেক্ষক ধীর সমবেগে দূরে সরে যেতে থাকে। যেহেতু দুই স্বনকেই শব্দ একসঙ্গে হয়, প্রথম প্রথম তাদের একসঙ্গেই শোনা যাবে; কিন্তু A এবং B-র মধ্যে দূরত্ব যতই বাড়তে থাকবে ততই তাদের শব্দ শোনার মধ্যে কালান্তর বাড়তে থাকবে, কেননা A থেকে শব্দ শ্রোতার কানে পৌঁছতে সময় লাগবে, আর B-র শব্দ সঙ্গে সঙ্গে কানে ঢুকবে। শেষে A থেকে আগত n'-তম ক্ষণশব্দ B-র $(n'-1)$-তম ক্ষণশব্দের সঙ্গে একসঙ্গেই শোনা যাবে—অর্থাৎ কানে দুই ক্ষণশব্দের সমাপতন হবে। দূরত্ব ক্রমাগত বাড়তে থাকলে সমব্যবধানে এইরকম সমাপতন বারবার ঘটতে থাকবে। দুই ক্রমিক সমাপতন-বিন্দুর গড় ব্যবধান d এবং সেকেণ্ডে n বার শব্দ হলে, $c=nd$ হবে। এখানে ব্যক্তিগত ত্রুটি নেই।

বসৃকা স্বনক হিসাবে দুটি বৈদ্যুতিক হাতুড়ি ব্যবহার (১৮৫৩) করেন। তাদের শ্রেণীসজ্জায় রেখে একই বিঘ্নিত (interrupted) বিদ্যুৎ-প্রবাহ দিয়ে চালানো হয়। প্রবাহ বিঘ্নিত করার জন্য বর্তনীতে একটি স্পন্দনশীল পত্রী থাকে; তার মুক্তপ্রান্তে ছোট একটুকরো তার ক্রমান্বয়ে একটি পারার পাত্রে ওঠা-নামা করে এবং প্রবাহে বিঘ্ন ঘটায়। পর্যায়ক্রমে এই বিঘ্ন ঘটতে থাকায় সমকালান্তরে হাতুড়ি দুটি জোরে ঠক্ ঠক্ শব্দ করতে থাকে। প্রবাহ-বিঘ্নক ব্যবস্থাটি একটি আবেশকুণ্ডলীর মুখ্য কুণ্ডলীতে আর হাতুড়ি দুটি তারই গৌণ কুণ্ডলীতে থাকে।

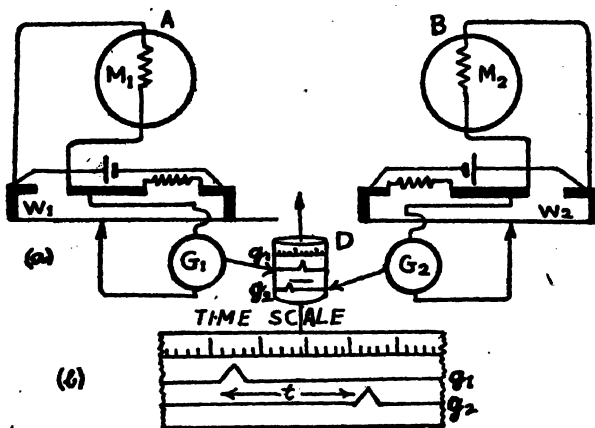
ক্যোনিগ্ এবং কাহ্ল এই পন্থায় আরও উন্নতি (১৮৬৪) আনেন। এক্ষেত্রে স্বনক একটিই এবং সে সচল। তার মূল শব্দ এবং দেওয়াল থেকে প্রতিফলিত শব্দের মধ্যে সমাপতন ঘটানো হয়। এক্ষেত্রে স্বনকটিকে ধীর সমবেগে প্রতিফলক থেকে সরিয়ে নিয়ে যাওয়া হতে থাকে। এখানে স্বনক আর প্রতিফলনের দরুন উদ্ভূত তার অলীক বিম্ব, দুই স্বনকের কাজ করে। এই পন্থা আলোকবিজ্ঞানে লয়েড-এর দর্পণ-পরীক্ষার সঙ্গে কতকটা তুলনীয়। এক্ষেত্রে $c=2nd$; এখানে পরীক্ষণ-দূরত্ব কমায়, জায়গা কম লাগে; কিন্তু প্রতিফলনে শাব্দপ্রাবল্যও কমে, কাজেই সমাপতন-বিচারে অনিশ্চয়তা আসে। উন্নততর সংস্করণে (১৮৭৭) হাতুড়ি দুটির ব্যবধান স্থির রেখে সেকেণ্ডে ক্ষণশব্দের সংখ্যা বদল ক'রে সমাপতন ঘটানো হয়। এই ব্যবধান যত বেশী থাকবে, পরীক্ষণ-ভ্রম ততই কমবে।

গ. রেনোঁ-র বৈদ্যুতিক লিপিকরণ পদ্ধতি (১৮৬৪): ব্যক্তিকে

বাদ দিয়ে রেনোঁ সম্পূর্ণ যান্ত্রিক উপায়ে শব্দগ্রহণের ব্যবস্থা করেন। 21.1 চিত্রে প্রদর্শিত যন্ত্রসজ্জা যথাক্রমে 2445 এবং 1280 মি ব্যবধানে দুই পরীক্ষণ-কেন্দ্র A এবং B-তে বসানো হয়। A ও B-র মধ্যে বৈদ্যুতিক সংযোগ থাকে। B-তে একটি বেলন সমবেগে ঘুরতে থাকে। সংলগ্ন একটি লেখনী S ঘূর্ণমান বেলনের গায়ে সোজা দাগ কাটতে থাকে। A-তে এমনভাবে কামান ছোঁড়া হয় যে, W তারখণ্ড ছিঁড়ে উড়ে যায় এবং

চিত্র 21.1—মুক্তবায়ুতে রেনোঁ-র শব্দবেগ-নির্ণয়-পন্থা

বর্তনী ছিন্ন হয়। সঙ্গে সঙ্গে লেখনী S একটু নড়ে গিয়ে টানা দাগের একপাশে দাগ ফেলে—এইভাবে শব্দসৃষ্টির মুহূর্তটি চিহ্নিত হয়। শব্দ B-তে পৌঁছে C শংকুতে গৃহীত হয়। শংকুর পিছনটি পাতলা নরম পর্দা দিয়ে বন্ধ; শব্দের চাপে তা ফুলে উঠে মুহূর্তের জন্য বর্তনী সম্পূর্ণ করে। তখনই বিদ্যুচ্চুম্বক M সক্রিয় হয়ে S-কে আকর্ষণ করে; ফলে বেলনে আর একটা চিহ্ন পড়ে। দুই চিহ্নের মধ্যে কালান্তর A থেকে B-তে শব্দ পৌঁছনোর সময়ের সমান। বেলনের কৌণিক বেগ থেকে এই সময় পাওয়া যায়। A এবং B-র মধ্যে দূরত্ব মেপে শব্দের বেগ সরাসরি মেলে। ব্যতিহার পর্যবেক্ষণ ক'রে বাতাস-জনিত ত্রুটি আর দুই ভিন্ন দূরত্বে পরীক্ষণ চালিয়ে যান্ত্রিক জড়তা-জনিত ত্রুটি অপনীত করা হয়।

ঘ. রেনোঁ-পদ্ধতির আধুনিক রূপ ঃ প্রায় জড়তা-বর্জিত লিখন-যন্ত্র ব্যবহার ক'রে এসক্ল্যাগোঁ গ্রাহকের 'ব্যক্তিভ্রম' নিশ্চিহ্ন করেন (১৯১৭); এজন্যে তিনি তপ্ত-তার মাইক্রোফোন এবং এইনথোভেন-এর তন্ত্রী-গ্যালভ্যানো-মিটার ব্যবহার করেন। শব্দসন্ধানী হিসাবে এইরকম দুটি মাইক্রোফোন 14 কিমি ব্যবধানে A এবং B-তে (চিত্র 21.2a) কামানের সঙ্গে একই রেখা বরাবর রাখা হয়। তারা সমকম্পাংক এবং সুবিধামতো পর্যবেক্ষণের জায়গায়

পাশাপাশি রাখা গ্যালভ্যানোমিটারের সঙ্গে যুক্ত। গ্যালভ্যানোমিটার দুটির দুই তারের প্রতিবিম্ব একটি সচল আলোক-সচেতন ফিল্‌মের ওপর ফোকাস করা থাকে। কাজেই সচল ফিল্‌মের উপর এই দুটি আলোক-বিন্দু সমান্তরাল দুই লাইন টেনে যেতে থাকে (21.2b চিত্রে g_1 এবং g_2)। ফিল্‌মের ওপর-দিকে 0.1 সে ক্রমাংকিত সময়-চিহ্ন t ছাপা থাকে। কামান ছোঁড়া হলে

চিত্র 21.2—এস্‌ক্ল্যাগোঁ-র শব্দবেগ-নির্ণয়-ব্যবস্থা

A এবং B স্টেশনে যখন ক্রমান্বয়ে শব্দ পৌঁছায় তখন তপ্ত-তার সক্রিয় হওয়ায় গ্যালভ্যানোমিটার কিরণ-সূচকের ক্ষণবিক্ষেপ ঘটে। সময়-স্কেলে এই দুই ক্ষণবিক্ষেপের অবকাশ, A থেকে B-তে যেতে শব্দের অতিবাহিত সময় (t)। সুতরাং AB দূরত্বকে এই অবকাশ দিয়ে ভাগ করলে শব্দের বেগ পাওয়া যায়।

এই পরীক্ষণক্রমে নানা বিধের (calibre) কামান ব্যবহার করা হয়েছিল। 0°C উষ্ণতা থেকে 20°C উষ্ণতা পর্যন্ত, ভিন্ন ভিন্ন বায়ুবেগে এবং আর্দ্রতা-ভেদে পরীক্ষণ চালানো হয় এবং গড় শব্দবেগ 0°C এবং শুষ্ক স্থির বায়ুতে 330.9 মি/সে ব'লে গৃহীত হয়। পরীক্ষার প্রমাণ হ'ল যে, শব্দের বেগ কামানের রন্ধ্র অর্থাৎ আদি শব্দপ্রাবল্যের ওপর নির্ভর করে না।

আঁগেরার এবং ল্যাডেনবার্গ-এর পরীক্ষণ (১৯২১) আরও বিস্তারিত এবং ফলাফল আরও নির্ভরযোগ্য। এখানে রেনোঁ-র মতো বারুদ-বিস্ফোরণে তার ছিন্ন করা হয় আর এস্‌ক্ল্যাগোঁ-র পন্থায় শব্দগ্রহণের ব্যবস্থা করা হয়। দুই পর্যবেক্ষণস্থলে একই বর্তনীর দুই মুখ্য কুণ্ডলী থাকে আর গ্যালভ্যানোমিটার

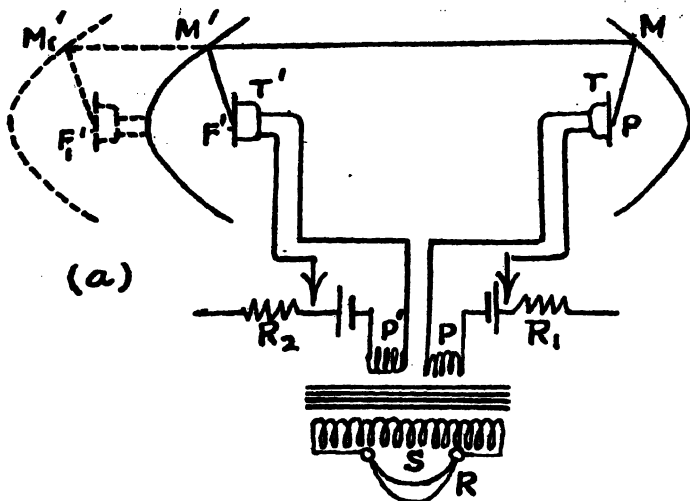
থাকে গৌণ কুণ্ডলীতে। প্রথম মুখ্য কুণ্ডলীতে রাখা তার ছিন্ন হয় আর শব্দসন্ধানী মাইক্রোফোনে শব্দ পৌঁছালেই দ্বিতীয় মুখ্য কুণ্ডলীতে বৈদ্যুতিক স্পন্দন সুরু হয়। দুই স্টেশনের মধ্যে দূরত্ব মাপার জন্য তাদের 6 থেকে 10 কিমি ব্যবধানে একটি ত্রিভুজ-শীর্ষে বসানো হয়। সুরশলাকা নিয়ন্ত্রিত একটি হিলিয়াম-বিদ্যুৎক্ষরণ নলের সাহায্যে 0.002 সে পর্যন্ত কালান্তর মাপা হয়। লব্ধ গড় শব্দবেগ $0°C$ এবং শুষ্ক বায়ুতে 330.8 ± 0.1 মি/সে দাঁড়ায়।

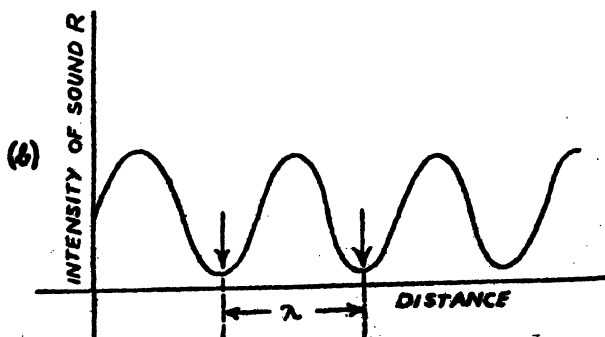
২৮-৩. সীমিত বায়ু-মাধ্যমে শব্দবেগ-নির্ণয়:

মুক্তবায়ুতে যেকোন অঞ্চলে স্থানীয় উষ্ণতা, ঘনত্ব ও আর্দ্রতা সদাই বদ্‌লায়। তাই মাধ্যমের বিষমসত্ত্বতা-জনিত ত্রুটি-নিরসন অসম্ভব, সে চেষ্টাও অবাস্তব। সীমিত মাধ্যমে নিলে এইসব ত্রুটি নিয়ন্ত্রণাধীন রাখা সম্ভব। মাধ্যম সীমিতকরণের সহজ পথ, দু'-মুখ-খোলা নলে বায়ুর মধ্যে শব্দতরঙ্গ পাঠিয়ে এবং স্থাণুতরঙ্গের উৎপত্তি ঘটিয়ে তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) ও তা থেকে $c = n\lambda$ সম্পর্ক প্রয়োগে তরঙ্গবেগ নির্ণয় করা। কিন্তু এইভাবে নির্ণীত তরঙ্গবেগের মান, খোলা বায়ুতে নির্ণীত বেগের চেয়ে কম বেরোয়; তার তত্ত্বগত ব্যাখ্যাও আছে। কিন্তু বড় একটা হল্‌ঘরে পরীক্ষা চালালে, নলে উৎপন্ন ত্রুটিও এড়ানো যায়, আবার মাধ্যমের উষ্ণতা, আর্দ্রতা বা উপাদানবৈচিত্র্য সহজে আয়ত্তে রাখা সম্ভব। আমরা এইজাতীয় প্রামাণ্য পরীক্ষা, হেব-এর পদ্ধতি প্রথমে আলোচনা ক'রবো। ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখের সাহায্যে এরই উন্নততর পরীক্ষণ এবং পিয়ার্স-উদ্ভাবিত স্বনোত্তর তরঙ্গে ব্যতিচারমান-যন্ত্রের প্রাসঙ্গিক ব্যবহারও আমাদের আলোচ্য হবে।

ক. হেব-এর ব্যতিচার-পদ্ধতি: মাইকেলসন-এর পরামর্শমতো বিজ্ঞানী হেব লম্বা একটি হল্‌ঘরে $(120' \times 10' \times 14')$ এই পরীক্ষাটি (১৯০৫) করেন; পরে ১৯১৯ সনে আরও সূক্ষ্মতা সহকারে পরীক্ষাটি অনুষ্ঠিত হয়েছিল।

21.3(*a*) চিত্রে ব্যবহৃত যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। M ও M' দুই পরবলয়াকার দর্পণ একই অক্ষ বরাবর অনেকখানি তফাতে আছে; তাদের উন্মেষ-ব্যাস $5'$ এবং ফোকাস-দূরত্ব $15''$; তারা প্লাস্টার-অফ-প্যারিসে তৈরী। M-এর ফোকাস F-এ (ছবিতে P) উচ্চ কম্পাংকের স্বনক, আর M'-এর ফোকাসের (F') খুব কাছে গ্রাহক। F ও F'-এর খুব কাছে T ও T' দুই উচ্চ দক্ষতার টেলিফোন-গ্রাহক। F-এ উৎপন্ন শব্দ M-এ প্রতিফলিত

হয়ে অক্ষের সমান্তরাল শব্দকিরণে পরিণত হয় এবং M'-এ প্রতিফলিত হয়ে T'-এর ওপর সংহত হয়। স্বনক ও গ্রাহক দুই-ই ব্যাটারী-চালিত এবং দুটি কুণ্ডলীর (P, P') সঙ্গে শ্রেণী-সমবায়ে যুক্ত। কুণ্ডলী-দুটি একটি লৌহমজ্জা

চিত্র 21.3(a)—ব্যতিচার-পদ্ধতিতে শব্দবেগ-নির্ণয়

(iron core) ট্র্যান্সফর্মারের মুখ্য কুণ্ডলী; এর গৌণ কুণ্ডলী (S) একটিই এবং তাতে তৃতীয় একটি টেলিফোন-গ্রাহক (R) থাকে; তাতে প্রত্যক্ষ এবং দুই আয়নায় প্রতিফলিত শব্দ দুই-ই শোনা যায়। স্বাভাবিকভাবেই

চিত্র 21.3(b)—বেধ-পদ্ধার তরঙ্গদৈর্ঘ্য

মূল শব্দের জোর অনেক বেশী; তাকে কমিয়ে প্রতিফলিত শব্দের সমপ্রাবল্য করতে T এবং P-র মাঝে এক পরিবর্তনীয় রোধক R_1 রাখা থাকে।

পরীক্ষা করতে P বিন্দুতে একটি স্থিরপ্রাবল্য হুইশ্‌ল্ বাজানো হয়—শব্দের কিছুটা T যন্ত্রের পর্দায় সরাসরি প'ড়ে স্পন্দন জাগায়; সেখানে স্পন্দনদশা FT দূরত্বের ওপর নির্ভর করে। উৎপন্ন শব্দের বাকীটা M এবং M' আয়নায় প্রতিফলিত হয়ে F' বিন্দুতে সংহত হয় এবং T' যন্ত্রের পর্দাকে স্পন্দিত করে—তার স্পন্দনদশা $PMM'F'$ দূরত্বের ওপর নির্ভর করে। সন্ধানী যন্ত্রে (R) সাড়া T এবং T' দুই প্রেরক যন্ত্রের যৌথ ক্রিয়ার সমানুপাতিক। R_1-এর মান নিয়ন্ত্রণ ক'রে T-এর সাড়া T'-এর সমান ক'রে নেওয়া হয়। এবার যদি T'-সহ M'-কে অক্ষ বরাবর সরানো হতে থাকে, তাহলে MM' দূরত্বের অনুপাতে দুই সাড়ার মধ্যে দশাভেদ বদ্‌লাতে থাকবে; দশাভেদ $180°$ হলে, R-এ কোন সাড়া মিলবে না। M'-এর সেই অবস্থান এবং পরবর্তী যে অবস্থানে R আবার নীরব হবে, তাদের দূরত্বের ব্যবধান ব্যবহৃত শব্দের তরঙ্গদৈর্ঘ্যের (λ) সমান। হুইশ্‌ল্-এর কম্পাংক (n) দিয়ে তাকে গুণ করলেই শব্দবেগ মিলবে। 21.3(b) চিত্রে MM' ব্যবধানের সঙ্গে R-এ প্রাপ্ত সাড়ার সম্পর্ক দেখানো হয়েছে।

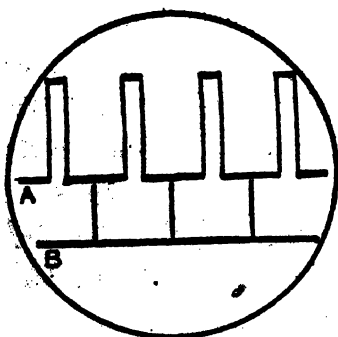
এই পরীক্ষণ-ব্যবস্থায় (১) বাতাসের কোন প্রশ্ন ছিল না, (২) মাধ্যম সম্পূর্ণ আবদ্ধ জায়গায় থাকায় উষ্ণতা, আর্দ্রতা ও বিষমসত্ত্বতা-জনিত ত্রুটিগুলির সম্পূর্ণ নিরসন, (৩) পর্যবেক্ষকের ব্যক্তিগত বা যান্ত্রিক ত্রুটির নিরসন, এবং (৪) জোরালো স্বনকের প্রয়োজন এড়ানো—সম্ভব হয়েছিল; অথচ কার্যত পরীক্ষা মুক্তবায়ুতেই হয়েছে ব'লেই ধরা যেতে পারে।

তরঙ্গদৈর্ঘ্য (λ) নির্ণয়ের জন্য 100 ফিট দূরত্বের মধ্যে দ্বিশতাধিক নীরবতা-বিন্দুর পাঠ নিয়ে তার গড় মান বার করা হয়; এতে আনুমানিক ত্রুটি মাত্র 0.1% ছিল। হুইশ্‌ল্-এর কম্পাংক (n) বার করতে আনুমানিক 512 হার্ৎ'জ কম্পাংকের এক প্রামাণ্য সুরশলাকার সাহায্য নেওয়া হয়; এই সুরশলাকার নির্ভুল কম্পাংক একটি প্রামাণ্য সেকেণ্ড-দোলকের সাহায্যে নির্ণয় করা হয়। হুইশ্‌ল্-এর কম্পাংকের মান 2376 হার্ৎ'জ বেরোয়; নানারকম সাবধানতা নিয়ে এই কম্পাংকে পরিবর্তন 5000 অংশের একভাগের মধ্যে সীমিত রাখা সম্ভব হয়। মোট ছয়টি নিরীক্ষণক্রম থেকে লব্ধ গড় মান এবং 0°C এবং শুষ্ক বায়ুতে শব্দের গতিবেগ 331.29 ± 0.4 মি/সে ব'লে গৃহীত হয় (১৯০৫); দ্বিতীয় পরীক্ষণ-ব্যবস্থায় (১৯১৯), উন্নতির ফলে, সূক্ষ্মতর মান 331.44 মি/সে পাওয়া যায়।

খ. ক্যাথোড-রশ্মি দোলন-লিখের ব্যবহার : দোলন-লিখের সঙ্গে

মাইক্রোফোন এবং লাউড-স্পীকারের সমন্বয় ঘটিয়ে সাধারণ পরীক্ষাগারে বায়ুতে শব্দের বেগ নির্ভুলভাবে নির্ণয় করা সম্ভব হয়েছে। আমরা দুটি পন্থা আলোচনা করবো। একটি প্যাশে এবং নোল্‌স-এর অনুসৃত (১৯৪৩)—তাকে আমরা হেব-পরীক্ষার উন্নততর সংস্করণ বলতে পারি ; অপরটি কলওয়েল, ফ্রেণ্ড এবং ম্যাকগ্র-র (১৯৩৮) উদ্ভাবিত বসৃকা-পদ্ধতির (১৮৬৪) সূক্ষ্মতর সংস্করণ।

প্রথম পরীক্ষণে মূল স্বনক একটি বিশুদ্ধ-সুর ভাল্‌ভ্‌-স্পন্দক ; উৎপন্ন স্পন্দনশক্তির কিছুটা একটি লাউড-স্পীকারে আর বাকীটা দোলন-লিখের এক-জোড়া পাতে সরবরাহ করা হয়। লাউড-স্পীকারে স্পন্দনজাত শব্দশক্তি সরাসরি মাইক্রোফোনে যায় ; মাইক্রোফোনে উৎপন্ন বিভবভেদ যায় দোলন-লিখের অপর জোড়া পাতে। তবে দোলন-লিখের পাতে পৌঁছানোর আগে এই বিভবভেদকে বাড়িয়ে আদি সংকেতের সমপ্রাবল্য ক'রে নেওয়া হয়। এখন লাউড-স্পীকার ও মাইক্রোফোনে উৎপন্ন বিভবভেদের প্রাবল্য ও কম্পাংক সমান, কিন্তু তাদের মধ্যে দশাভেদ থাকবে ; হেতু—দুই যন্ত্রের মধ্যে দূরত্ব। ফলে দোলন-লিখের পর্দায় দুই স্পন্দনের উপরিপাতনে দশাভেদ-নিয়ন্ত্রিত **লিসাজু-চিত্র** দেখা দেবে। এই চিত্রের আকার থেকে দশাভেদ এবং দশাভেদ থেকে দুই যন্ত্রের মধ্যবর্তী দূরত্ব অতিক্রম করতে শব্দের কতটা সময় লাগে, তা পাওয়া যায়। অতিক্রান্ত দূরত্ব খুব সতর্কতা-সহ মেপে, এই সময় দিয়ে ভাগ করলে বায়ুতে শব্দের বেগ মেলে। বলা বাহুল্য যে, হেব-এর পদ্ধতিতে যেগুলি সুবিধা সেগুলি এখানে আরও বেশী প্রযোজ্য।

দ্বিতীয় পরীক্ষণে একটি দ্বি-কিরণ দোলন-লিখ ব্যবহার করা হয়েছে। এখানে ব্যবহৃত ইলেকট্রন-কিরণ দুটি এবং তাই গ্রাহক পর্দায় দুটি সচল আলোর তিলক (spot) দেখা যায়। দোলন-লিখের উল্লম্ব পাত-জোড়ার ক্রিয়ায় তিলক দুটি অনুভূমিক অক্ষ বরাবর সমবেগে বাঁ থেকে ডাইনে সরতে থাকে। আবার দু'জোড়া অনুভূমিক পাত দুই কিরণকে খাড়া দিকে সরাতে পারে। প্রতিটি সচল কিরণের ওপর পরস্পর সমকোণে দুই বিভবভেদ সক্রিয় হওয়ায় স্পন্দনের তরঙ্গরূপ পর্দায় দেখা দেয় এবং দুটি তরঙ্গরূপ তুলনা করা যায়।

চিত্র 21.4—দ্বি-কিরণ দোলন-লিখে সাড়া

এখানে লাউড-স্পীকার চালায় ভাল্‌ভ-স্পন্দকের বদলে একটি মৃদু-দীপ্ত ক্ষরণ-(glow discharge) বাতি ; এই ক্ষরণ-বাতি প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারা-চালিত। এই ব্যবস্থায়, প্রত্যাবর্তী প্রবাহের পর্যায়কাল পরপর, লাউড-স্পীকারে একটি একটি ক্ষণশব্দ হতে থাকে ; এই ক্ষণশব্দই মাইক্রোফোনকে সক্রিয় করে। লাউড-স্পীকারে প্রযুক্ত বিভবভেদের কিছু অংশ একটি ইলেকট্রন কিরণকে সচল করে আর মাইক্রোফোনে উদ্ভূত বিভবভেদ অপর কিরণটিকে চালু করে। দুই কিরণই অনুভূমিক অক্ষ বরাবর সমবেগে সরে এবং প্রত্যাবর্তী প্রবাহের পর্যায়কাল পরপর একই পথে বাঁ থেকে ডাইনে সরে। তাদের ওপর লাউড-স্পীকার ও মাইক্রোফোনের বিভবভেদ লম্ব দিকে যুক্ত হয়ে স্থির তরঙ্গরূপ উৎপন্ন করে। তাদের খাড়া দাঁতের মতো (চিত্র 21.4) দেখায়, কিন্তু দশাভেদের কারণে তাদের অবস্থান ভিন্ন হয়। স্বনক থেকে মাইক্রোফোন আস্তে আস্তে সরিয়ে নিয়ে যাওয়া হতে থাকে, যতক্ষণ না দুই দন্তপঙ্‌ক্তি এক রেখায় আসে। এই অবস্থান থেকে মাইক্রোফোনকে আবার সরিয়ে নেওয়া হয়, যতক্ষণ না তারা আবার সমরেখ হয়। সেই দূরত্ব লাউড-স্পীকারে উৎপন্ন তরঙ্গের দৈর্ঘ্য (λ) এবং তার কম্পাংক (n) প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎপ্রবাহের কম্পাংকের সমান।

গ. **স্বনোত্তর ব্যতিচারমান-যন্ত্রের ব্যবহার :** স্বনোত্তর তরঙ্গ কানে শোনা না গেলেও, তার সব ধর্মই শব্দতরঙ্গের মতো। তার কম্পাংক খুব বেশী, কাজেই তরঙ্গদৈর্ঘ্য কম। পিয়ার্স-এর উদ্‌ভাবিত (১৯২৫) ব্যতিচারমান-যন্ত্রের (চিত্র 20.11a) সাহায্যে এই দৈর্ঘ্য খুব সূক্ষ্মভাবে মাপা সম্ভব। স্বল্পবিস্তার স্বল্পকম্পাংক স্বনোত্তর তরঙ্গের বেগ সাধারণ স্বনতরঙ্গেরই সমান। সুতরাং স্বনোত্তর-তরঙ্গবেগ ব্যতিচারমান-যন্ত্রের সাহায্যে নির্ণয়ই, শব্দবেগ-নির্ণয়ের সর্বাধুনিক পন্থা। এই তরঙ্গের দৈর্ঘ্য খুব কম ব'লে অল্প পরিমাণ মাধ্যমেই স্থাণুতরঙ্গ সৃষ্টি ক'রে তার দৈর্ঘ্য নিখুঁতভাবে মাপা সম্ভব। ফলে প্রতিটি মাপ এবং মাধ্যমের ভৌত অবস্থা সূক্ষ্মভাবেই নিয়ন্ত্রণাধীন।

২১-৪. নলের সাহায্যে বায়ুতে শব্দবেগ-নির্ণয় :

এই শ্রেণীর পরীক্ষা-নিরীক্ষায় **সুবিধাগুলি** সহজবোধ্য। বাতাস থাকে না, উষ্ণতা এবং আর্দ্রতার মান অপরিবর্তিত রাখা অনেক সহজ, সামান্য পরিমাণ গ্যাস হলেই চলে, দরকারমতো তরলও ব্যবহার করা যায়। কার্যত শব্দবেগের প্রভাবকগুলি (§ ৬-৮) অর্থাৎ মাধ্যমের চাপ, উষ্ণতা, ঘনত্ব, আর্দ্রতা, আণবিক গঠন, স্বনকের বিস্তার বা কম্পাংক কি-ভাবে শব্দের বেগকে

নিয়ন্ত্রিত করে তার সঠিক নির্ধারণ, নলের মধ্যে পরীক্ষার ফলাফল থেকে বের করাই সহজসাধ্য।

আবার আনুষঙ্গিক অসুবিধাও কিছু কিন্তু আছে। নলে বায়ুমাধ্যম সব দিকেই সীমিত—বিস্তৃত মাধ্যমের সব ধর্ম সীমিত মাধ্যমে অক্ষুণ্ণ থাকতে পারে না। নলে শব্দ-চলাকালে ধাতুগাত্রে সান্দ্রতা ও তাপ-সঞ্চালনের ক্রিয়ায় বেগের মান কমে যায়—এই হ্রাস মোটামুটিভাবে নলের ব্যাসের ব্যস্তানুপাতিক। ফলে ঘনীভবন ও তনুভবনে রুদ্ধতাপ অবস্থা আর থাকে না; নল খুব সরু হলে শব্দবেগ ল্যাপ্‌লাস-সূত্রের বশবর্তী না হয়ে নিউটন-সূত্রের অনুসারী হতে চায়। হেল্‌ম্‌হোল্‌ৎজ ও কারশফ-এর বিশ্লেষণ অনুসারে নলে ও মুক্তবায়ুতে শব্দের বেগের অনুপাত দাঁড়ায়

$$\frac{c_t}{c_0} = 1 - \frac{k}{d\sqrt{n\pi}}\,; \quad k = \sqrt{\mu} + (\gamma - 1)(\nu/\gamma)^{\frac{1}{2}}$$

এখানে k সান্দ্রতা এবং তাপ-পরিবহণ-গুণাংক-নির্ভর এক ধ্রুবক, d নলের ব্যাস, n স্বনক-কম্পাংক, মাধ্যমের সান্দ্রতা μ, তাপ-ব্যাপনতা ν ও আপেক্ষিক তাপদ্বয়ের অনুপাত γ। মিটারে মাপজোখ করলে k-র মান 0.6 আসে। কে ও শেরাট্‌ বিস্তারিত পরীক্ষা-নিরীক্ষা থেকে সিদ্ধান্ত করেন যে, নলগাত্র মসৃণ হলে, k-র বাস্তবে মান তার তাত্ত্বিক মানের 0.9 গুণ হবে, কিন্তু অমসৃণ হলে, 30% পর্যন্ত বেশী হতে পারে। নর্টন-এর মতে স্বনোত্তর বেগে k-র মান 0.47 হয়, তত্ত্বমতে হওয়ার কথা কিন্তু 0.54। মোটামুটিভাবে নলে শব্দবেগের এই শুদ্ধমানগুলি পরীক্ষায় সমর্থিত হয়েছে। দেখা যাচ্ছে যে, নলে বেগহ্রাস, ব্যাসের এবং কম্পাংকের বর্গমূলের ব্যস্তানুপাতিক।

নলে শব্দবেগ-নির্ণয়ের পন্থাগুলিকে দুই শ্রেণীতে ফেলা যায়—(ক) রেনোঁ-প্রবর্তিত পন্থায়, সরাসরিভাবে অতিক্রান্ত পথকে অতিক্রমণ-কাল দিয়ে ভাগ ক'রে, আর (খ) কুণ্ড্‌-প্রবর্তিত পন্থায়, বদ্ধ নলে অনুনাদী স্পন্দন ও স্থাণুতরঙ্গ উৎপন্ন ক'রে, তরঙ্গদৈর্ঘ্য নির্ণয় ক'রে পরোক্ষভাবে—শব্দবেগ-নির্ণয়।

ক. রেনোঁ-র প্রত্যক্ষ পদ্ধতি: ১৮৬২-৬৩ সনে প্যারি নগরে জল-সরবরাহের পাইপ-বসানোর সুবিধা কাজে লাগিয়ে রেনোঁ নলে শব্দের বেগ নিয়ে বিস্তারিত পরীক্ষা করেন। নলের মোট দৈর্ঘ্য ছিল প্রায় 49 মিটার এবং ব্যাস 11 থেকে 110 সেমি পর্যন্ত। শব্দের উৎস পিস্তল-নির্ঘোষ; উৎপত্তিক্ষণ এক সমবেগে ঘূর্ণমান ড্রামের ওপর মুদ্রিত; মুদ্রণপন্থা বৈদ্যুতিক। নলের

অপরপ্রান্তে শব্দ পৌঁছে পাতলা এক পর্দা ঠেলে বর্তনী সম্পূর্ণ করলে সেই মুহূর্তটিও ড্রামের গায়ে লিখিত হয় (§ ২১-২গ)। বারবার প্রান্তিক প্রতিফলন ঘটিয়ে অতিক্রান্ত পথ 20 কিমি পর্যন্ত বাড়ানো এবং নলে বায়ুচাপ 24.7 সেমি থেকে 126.7 সেমি (পারদ-স্তম্ভ) পর্যন্ত বদ্‌লানো হয় ; উষ্ণতা ও আর্দ্রতার দরুন সংশোধনও করা হয়। তাতে মোটা নলে 0°C উষ্ণতায় এবং শুষ্ক বায়ুতে শব্দবেগের সীমান্ত মান দাঁড়াল 330.6 মি/সে ; তা থেকে মুক্ত বায়ুর জন্য সংশোধিত শব্দবেগ 331.1 ± 0.1 মি/সে আসে। রেনো-র পরীক্ষালব্ধ সিদ্ধান্তগুলি হ'ল—

(১) নলের মধ্যে শব্দপ্রাবল্য দূরত্বের সঙ্গে কমতে থাকে ; নল যত সরু, ক্ষয়হারও তত বেশী।

(২) শব্দপ্রাবল্য কমার সঙ্গে শব্দের বেগ এক নির্দিষ্ট নিম্নসীমা পর্যন্ত নামে।

(৩) নলের ব্যাস বাড়লে শব্দবেগ বাড়ে—তার ঊর্ধ্বসীমা 330.6 মি/সে ; দুই সীমান্ত-মান সমান।

(৪) শব্দের বেগ চাপ-নিরপেক্ষ।

(৫) শব্দবেগ মাধ্যমের ঘনত্বের বর্গমূলের ব্যস্তানুপাতে বদ্‌লায়।

নলে H_2, CO_2, N_2O এবং NH_3 ব্যবহার করা হয়েছিল।

রেনো-র ফল নিম্নলিখিত সূত্রের মাধ্যমে প্রকাশ করা যায় :

$$\left(\frac{c_0}{c}\right)^2=\frac{1-3f/8h}{1+\alpha_p t}$$

এখানে c পরীক্ষালব্ধ বেগ, c_0 শূন্য ডিগ্রী সে এবং শুষ্ক অবস্থায় বায়ুতে শব্দবেগ, t°C উষ্ণতা, α_p স্থির চাপে বায়ুর আয়তন-প্রসারণ-গুণাংক, f জলীয় বাষ্পচাপ এবং h ব্যারোমিটারে উচ্চতা।

ভিয়োল এবং ভটিয়ের নামে আরও দুজন ফরাসী বিজ্ঞানী 6 কিমি তফাতে দুই নগরের মধ্যে সমান্তরাল পাইপ-বসানোর সুযোগ নিয়ে (১৮৯০) আরও বিস্তারিত পরীক্ষা চালান। এখানে নলের ব্যাস ছিল 70 সেমি এবং সমান্তরাল পাইপ-দুটির মুখ অর্ধবৃত্তাকার নল দিয়ে জুড়ে তাঁরা শব্দের অতিক্রমণ-পথ 12,687 মিটার দীর্ঘায়িত করেন। এই ব্যবস্থায় সুবিধা ছিল যে, এই পথের সুরু এবং শেষ একই পর্যবেক্ষকের তত্ত্বাবধানে রাখা সম্ভব হয়েছিল। তাঁদের পরীক্ষালব্ধ সিদ্ধান্তগুলি নিচে দেওয়া হ'ল :

(১) শব্দ-উৎপাদনে আদি বিক্ষোভ যেরকমই হোক না কেন, পথ-অতিক্রমণ-কালে তরঙ্গ একটি সরল নির্ণেয় রূপ গ্রহণ করে।

(২) এই আকারে পৌঁছানোর পর তরঙ্গের প্রতিটি অংশই সমবেগে চলে।

(৩) পিস্তল-নির্ঘোষ-জাত শব্দতরঙ্গ আকৃতিতে জটিল, তার ভিন্ন ভিন্ন অংশ ভিন্ন ভিন্ন বেগে চলতে সুরু করে; কিন্তু অল্প পরেই চরম ঘনীভবন স্বাভাবিক মাত্রায় পৌঁছয় এবং দ্রুতগতি-তরঙ্গমুখ হ্রস্ববেগ হয়ে স্বাভাবিক বেগে আসে।

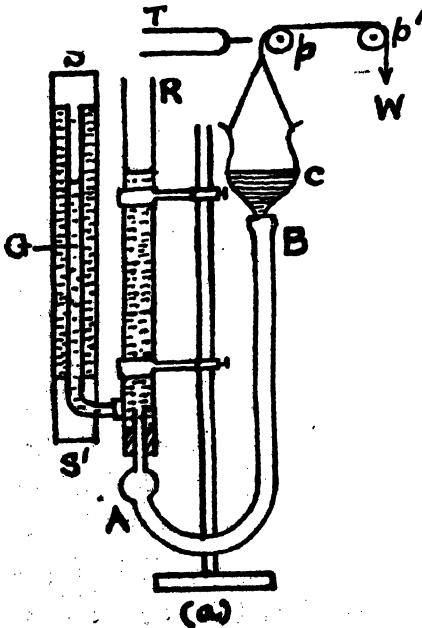
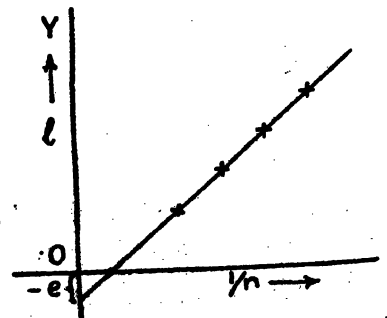
(৪) পিস্তলের শব্দপ্রাবল্য শব্দবেগকে প্রভাবিত করে না, কিন্তু প্রাবল্য বাড়লে শব্দ দ্রুততর চলে।

(৫) সাধারণ প্রাবল্য ও স্বন-কম্পাংকে শব্দবেগ অক্ষুণ্ণ থাকে।

(৬) খোলা হাওয়ায় শব্দবেগ নলে শব্দবেগের চেয়ে বেশী; বেগের হ্রাসহার নলের ব্যাসের ব্যস্তানুপাতিক।

রেনোঁ-র সূত্র প্রয়োগ ক'রে তাঁরা 0°C-এ শুষ্ক বায়ুতে নলে শব্দবেগ পেলেন 330.33 মি/সে এবং মুক্তবায়ুর জন্যে সংশোধন ক'রে পেলেন 331.007 মি/সে।

খ. স্থাণুতরঙ্গ পদ্ধতি: (১) পরীক্ষাগারে অনুনাদী নলের (চিত্র 21.5*a*) সাহায্যে

(*a*) (*b*)

চিত্র 21.5(*a*)—অনুনাদী নলে শব্দবেগ-নির্ণয়

চিত্র 21.5(*b*)—নলের প্রান্তীয় ত্রুটি-নির্ণয়

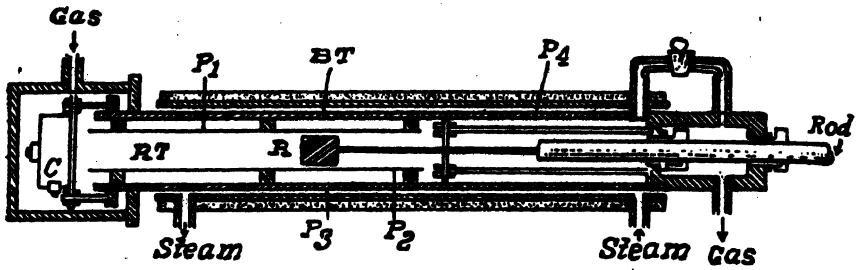
শব্দের বেগ-নির্ণয় একটি সরল এবং বহুল-ব্যবহৃত পদ্ধতি। এই পদ্ধতিতে নানা ত্রুটির মধ্যে প্রান্তীয় ত্রুটি অন্যতম ; সে-সম্বন্ধে তাত্ত্বিক বিশ্লেষণ অনেকেই করেছেন। সর্বাধুনিক গণনা অনুযায়ী তার মান $d/2\sqrt{3}$ বা $0.29d$; ভিন্ন ব্যাসের দুই নল নিয়ে বা একই নলে দুটি ক্রমিক অনুনাদী দৈর্ঘ্য, একই সুরশলাকা সাপেক্ষে বার ক'রে এই ত্রুটি দূর করা হয়। যদি কয়েকটি সুরশলাকা মেলে, তবে পরীক্ষা ক'রেই প্রান্তিক ত্রুটির মান নির্ণয় করা যায়। সে-উদ্দেশ্যে প্রতিটি সুরশলাকার দরুন অনুনাদী দৈর্ঘ্য (l) পরীক্ষা ক'রে স্থির করা হয় ; তারপর এক লেখচিত্রে x-অক্ষ বরাবর $(1/n)$ এবং y-অক্ষ বরাবর l-এর মান বসালে (চিত্র 21.5b) একটি সরলরেখা আসে। y-অক্ষের ওপর তার নেগেটিভ ছেদই প্রান্তীয় ত্রুটি e ; কেননা ১৪-৬.১ সূত্র থেকে পাই

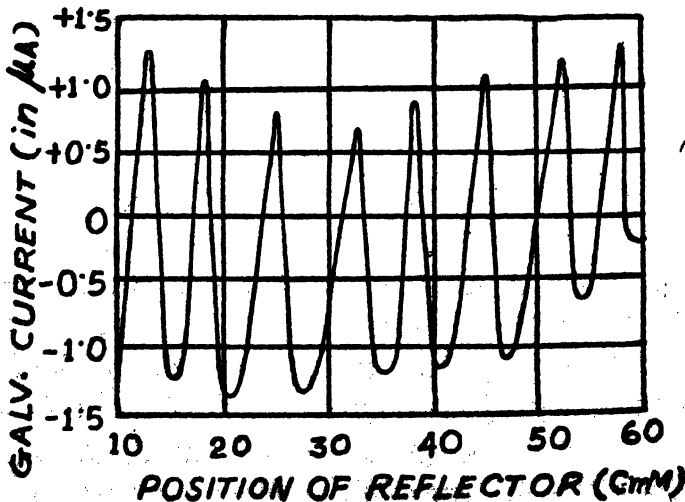
$$\frac{\lambda}{4}=\left(l+e\right) \quad \text{বা} \quad \frac{c}{4n}=\left(l+e\right) \quad \text{বা} \quad l=\frac{c}{4}\cdot\left(\frac{1}{n}\right)-e$$

স্বাভাবিকভাবেই, এই পদ্ধতিতে নির্ণীত বেগের মানের ওপর বিশেষ আস্থা রাখা যায় না।

(২) **Kundt-নল** (১৮৬৬)**:** এই ব্যবস্থার ক্রিয়াপদ্ধতি সম্বন্ধে বিশদ আলোচনা ১৪-৯ অনুচ্ছেদে করা হয়েছে। এতে n কম্পাংকে স্পন্দনশীল পিতলের রড্ স্পন্দক ; সেটি নলের এক মুখে থাকে আর অপর মুখটি চাক্তি দিয়ে বন্ধ। চাক্তি থেকে প্রতিফলিত শব্দতরঙ্গ উপরিপাতনের ফলে স্থাণুতরঙ্গ সৃষ্টি করে। হাল্কা কর্কের গুঁড়ো দিয়ে নিস্পন্দতলগুলি (চিত্র 14.12) নির্দিষ্ট হয়। পরপর দুটি নিস্পন্দতলের মধ্যে দূরত্ব $\lambda/2$; $c=n\lambda$ সূত্র থেকে নলের মধ্যে বায়ুতে শব্দের বেগ বেরোয়।

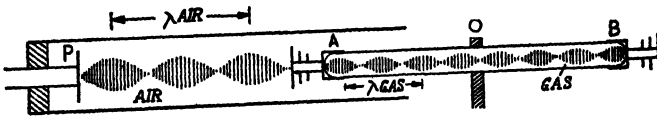
(৩) পার্টিংটন ও শিলিং (১৯২৩) এবং কে ও শেরাট (১৯৩৩) এই পদ্ধতির প্রভূত উন্নতি ঘটিয়েছেন। এঁরা স্পন্দক হিসাবে কোয়াৎর্জ-স্পন্দক এবং প্রত্যাবর্তী প্রবাহ-চালিত লাউড-স্পীকার ব্যবহার করেছেন। এ-ছাড়া কোয়াৎর্জ-স্পন্দক-নিয়ন্ত্রিত ভাল্ভ্ থেকে স্বন-কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী ধারায় সক্রিয় টেলিফোন-ঝিল্লীও স্বনক হিসাবে ব্যবহৃত হয়েছে। তৃতীয় ব্যবস্থায় কম্পাংক নিখুঁতভাবে আয়ত্তাধীন থাকে। 21.6 চিত্রে কে ও শেরাট-এর উদ্ভাবিত যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। এখানে টেলিফোন-ঝিল্লী (C) স্পন্দক। অনুনাদ-নলটি (RT) আর-একটি লম্বা পিতলের নলের (BT) মধ্যে থাকে। প্রতিফলক (R) একটি বেলন, তার প্রস্থচ্ছেদ নলেরই প্রায় সমান। ইস্পাতের রড্ টেনে তাকে সরানো হয় এবং সে-সরণ খুব সূক্ষ্মভাবে মাপা

যায়। চারটি তাপবৈদ্যুত সন্ধি (thermo-junctions—P_1 P_2 P_3 P_4) নলের ভিন্ন ভিন্ন জায়গায় উষ্ণতা মাপে। নিরীক্ষণকালে স্পন্দকের কম্পাংক অক্ষুণ্ণ রেখে প্রতিফলকটি সরিয়ে সরিয়ে প্রতি অবস্থানে ঝিল্লীতে উৎপন্ন বিভবভেদের পাঠ নেওয়া হয়। প্রতিফলিত তরঙ্গের দশাভেদ এবং ঝিল্লীর

চিত্র 21.6—কে এবং শেরাট-এর অনুনাদী নল

ওপর প্রতিফলিত তরঙ্গের প্রতিক্রিয়ায় টেলিফোনের বৈদ্যুতিক-বাধ পরিবর্তন হতে থাকায় বিরোধী বিভবভেদ ঘটে ; অনুনাদ প্রতিষ্ঠিত হলে, প্রবল স্পন্দনে এই বাধ হঠাৎ অনেকটা কমে গিয়ে গ্যালভ্যানোমিটারে জোর বিক্ষেপ হয়। প্রতিফলক সরাতে সরাতে যে যে বিন্দুতে গ্যালভ্যানোমিটারে এইরকম জোর বিক্ষেপ হয়, সেগুলি চাপের সুস্পন্দবিন্দু, তাদের পারস্পরিক ব্যবধান $\lambda/2$;

চিত্র 21.7—কে-শেরাট নলে অনুনাদী তরঙ্গশ্রেণীর অবস্থান

21.7 চিত্রে কাচ-নলে বায়ু-মাধ্যমে 16.7° সে উষ্ণতায় এবং 2636 চক্র কম্পাংকে প্রতিফলকের অবস্থান ও গ্যালভ্যানোমিটার-বিক্ষেপের সম্পর্ক দেখানো হয়েছে। পরীক্ষা-নলটিকে রুদ্ধবাত অবস্থায় রেখে, চাপ এবং উষ্ণতা বদ্‌লাবার যথাযথ ব্যবস্থাও ছিল। এখানে 0.1% সূক্ষ্মতায় শব্দবেগ মাপা সম্ভব।

(৪) বেহ্‌ন ও গ্যেইগার-এর সংশোধিত নল : বায়ুর বদলে অন্য গ্যাস কুণ্ড্‌-নলে ভরে ভিন্ন ভিন্ন চাপে ও উষ্ণতায় শব্দের বেগ মোটামুটি সূক্ষ্মভাবে মাপা চলে। কিন্তু নলকে সম্পূর্ণ বায়ুমুক্ত করা যায় না ব'লে এই দুই বিজ্ঞানী কুণ্ড্‌-নলের সংশোধন ক'রে বায়ু ও গ্যাসে শব্দবেগের অনুপাত-নির্ণয়ের খুব সহজ ব্যবস্থা করেছেন।

21.8 চিত্রে যন্ত্রসজ্জা দেখানো হয়েছে। AB মধ্যবিন্দুতে দৃঢ়ভাবে আবদ্ধ একটি সরু নল ; সেটি-ই কুণ্ড্‌-নলের উত্তেজক স্পন্দকের ভূমিকা নেয়।

চিত্র 21.8—বেন ও গাইগার-এর অনুনাদী নল

এই নলটিকে সম্পূর্ণ শুষ্ক ক'রে তার মধ্যে লাইকোপোডিয়াম গুঁড়া এবং পরীক্ষণীয় গ্যাস ভরা হয়। এর দু'প্রান্তে স্ক্রু-কাটা ধাতুর ছোট রড্‌ লাগানো ; তাতে ধাতুর চাক্‌তি পরিয়ে নলের কার্যকর দৈর্ঘ্য বাড়ানো যায়। যতক্ষণ না এই নলের গ্যাসে অনুনাদ সৃষ্টি হয় ততক্ষণ এই চাক্‌তি নড়ানো হয়। নলটি বিদ্যুৎ-চুম্বকীয় পন্থায় উত্তেজিত এবং অনুনাদের দৈর্ঘ্য পেলে তাকে প্রশস্ততর অনুনাদী নলের স্পন্দন-উত্তেজক হিসাবে ব্যবহার করা হয়। এবারে সেই নলে বায়ুস্তম্ভের দৈর্ঘ্য নিয়ন্ত্রণ ক'রে অনুনাদ প্রতিষ্ঠা করা হয়। তখন $c_a/c_g=\lambda_a/\lambda_g$; c এবং λ যথাযথ মাধ্যমে শব্দবেগ এবং তরঙ্গদৈর্ঘ্য। c_a জানা থাকলে c_g বার করা যায়। রাসায়নিক বিশুদ্ধতা বজায় রেখে c_g বার করতে এই পন্থাই শ্রেষ্ঠ। এখানে গ্যাস-নলের দৈর্ঘ্য 70 থেকে 80 সেমি, এবং ব্যাস 2.5 সেমি ; ধাতু-চাক্‌তিগুলির ব্যাস সামান্য কম, তাদের বেধ 1 মিমি এবং তারা সীসার তৈরী।

২৮৮. প্রামাণ্য অবস্থায় বায়ুতে শব্দের বেগ :

এখানে প্রামাণ্য অবস্থা বলতে—0°C উষ্ণতা, আর্দ্রতা নগণ্য এবং বায়ু-মাধ্যম মুক্ত বোঝানো হয়েছে। বিভিন্ন পন্থায় নির্ণীত শব্দবেগের পন্থা, কর্মী, কাল এবং মান সারণী-ভুক্ত করা হ'ল :

পন্থা	কর্মী	কর্মকাল	বেগ (মি/সে)
কামান-গর্জন	(*a*) Regnault	১৮৬৪	330.7
	(*b*) Esclangon	১৯১৭-১৯	330.9
	(*c*) Angerer and Ladenberg	১৯২১	330.8
	(*d*) Miller	১৯৩১	331.36
ব্যতিচার	(*a*) Hebb	১৯০৫,১৯১৯	331.41
	(*b*) Pierce and Reid	১৯২৫-৩৩	331.68
অনুনাদী নল	(*a*) Thiessen	১৯০৮	331.92
	(*b*) Gruneissen	১৯২১	331.57
	(*c*) Partington & Shilling	১৯২৮	331.4

বায়ুতে শব্দবেগ-নির্ণয়ের সূত্রে একটি তাত্ত্বিক অসঙ্গতি আছে—বায়ু আদর্শ গ্যাসও নয়, তাকে দ্বি-আণবিক ($\gamma = 1.414$) ব'লে ধরাও যায় না। সুতরাং বেগের সূত্র, $c = \phi\sqrt{\gamma P/\rho}$ আকারে লেখা উচিত ; ϕ সংশোধক রাশি, গ্যাসের অবস্থা-সমীকরণ থেকে নির্ণেয়। বার্থেলো এবং ভ্যান ডার ওয়াল্‌স-এর গ্যাস-সমীকরণদ্বয় থেকে নির্ণীত ϕ-এর গড় মান এবং পরীক্ষা-লব্ধ γ-র গড় মান (1.403) নিয়ে শব্দবেগের তত্ত্বসম্মত সংশোধিত মান দাঁড়ায়

$$c_0 = 331.36 \pm 0.05 \text{ মি/সে}$$

লক্ষণীয় যে, মিলার-এর পরীক্ষা-লব্ধ মানের সঙ্গে এই তাত্ত্বিক মান মিলে যায়।

২৯-৬. জলে শব্দের বেগ-নির্ণয় :

তরলের আয়তন-বিকারাংক K ধরলে, তাতে শব্দের বেগ $\sqrt{K/\rho}$ হবে। আয়তন-বিকারাংক রুদ্ধতাপ এবং সমোষ্ণ হয় ; কিন্তু তরল মাত্রেই অসংনম্য ব'লে এই দুই মানের মধ্যে তফাৎ নগণ্য। বায়ুমণ্ডলের সমান চাপ-প্রয়োগে জলের সংনম্যতা 0.00005 মাত্র। সুতরাং জলে আয়তনাংক ও শব্দবেগ যথাক্রমে

$$K = \frac{76 \times 13.6 \times 981}{5 \times 10^{-5}} = 2.03 \times 10^{10} \text{ ডাইন/সেমি}^2 \text{ এবং}$$

$$c = \sqrt{2.303 \times 10^{10}} = 1420 \text{ মি/সে}$$

জলে দূরপাল্লায় শব্দের বেগ প্রথম নির্ণয় করেন (১৮২৬) কোলাডন ও স্টার্ম নামে দুই বিজ্ঞানী। তাঁরা জেনেভা হ্রদে সংকেত-পদ্ধতিতে এই পরীক্ষণ চালান। জলের তলায় একটা বড় ঘণ্টা বাজানো হয় এবং সঙ্গে সঙ্গে জলের ওপরে আলোক-সংকেত করা হয়। 14 কিমি দূরে একটা বড় শিঙা জলের তলায় সেই শব্দ-সংকেত সংগ্রহ করে। পর্যবেক্ষক আলো-দেখা ও শব্দ-শোনার কালান্তর নির্ণয় ক'রে 8°C উষ্ণতায় জলে শব্দবেগ 1435 মি/সে পেয়েছিলেন। এতে আনুমানিক ত্রুটি 2% মতো হয়েছিল।

অন্য গবেষকেরা **সমুদ্র-গভীরে শব্দের বেগ** নির্ণয়ে মনোযোগ দেন। সমুদ্রের গভীরতা-নির্ণয়, ডুবো-জাহাজ বা ডুবো-পাহাড়ের সন্ধান, ঘন কুয়াশায় শাব্দ-বেতার (radio-acoustic) পদ্ধতিতে জাহাজের অবস্থান-নির্ণয় প্রভৃতি গুরুত্বপূর্ণ জ্ঞাতব্য বিষয়গুলির সর্বপ্রথম সোপান, সমুদ্রজলে শব্দবেগের সঠিক মান জানা। জলের উষ্ণতা এবং লবণাক্ততা এই মানকে প্রভাবান্বিত করে। সমুদ্রজলের ঘনত্ব মোটামুটি সমান থাকায় এবং শব্দশোষণ ও বিক্ষেপণ তুলনায় অনেক কম হওয়ায়, বায়ুর পরিবর্তে জলের মাধ্যমে শব্দসংকেত প্রেরণ ও গ্রহণ অনেক সোজা।

এ বিষয়ে সবচেয়ে বিস্তারিত এবং সম্পূর্ণাঙ্গ কাজ করেন (১৯১৯-২২) উড, ব্রাউন এবং কক্রেন নামে তিন ব্রিটিশ বিজ্ঞানী। তাঁরা ডোভার-এর কাছে সমুদ্রগভীরে প্রায় 4 কিমি তফাতে তফাতে একই রেখায় চারটি মাইক্রোফোন পাতেন ; এদের ব্যবধান নিখুঁতভাবে জরিপ ক'রে বার করা হয়। এদের সমরেখায় সমুদ্রগর্ভে বিস্ফোরণ ঘটিয়ে জোড়া-জোড়া মাইক্রোফোনের (এখানে তিন) মধ্যবর্তী দূরত্ব যেতে শব্দ কত সময় নেয়, তা একটি ছয়-তার-বিশিষ্ট এইনথোভেন গ্যালভ্যানোমিটারের সাহায্যে আলোকচিত্রে মুদ্রিত

ক'রে নির্ণয় করা হয়েছিল। চারটি তার চারটি মাইক্রোফোনের সঙ্গে যুক্ত, পঞ্চমটি এক অর্ধসেকেণ্ড ক্রোনোমিটার বা ঘড়ির ক্রিয়ায় সক্রিয়, আর ষষ্ঠ তারটি এক বেতার-সংকেত গ্রহণ ক'রে বিস্ফোরণ-মুহূর্ত লিপিবদ্ধ করে। তাঁরা দেখান—শব্দবেগ ফিটে, উষ্ণতা সেলসিয়াসে এবং লবণাক্ততা (S) হাজার-করার মাপলে, তাদের মধ্যে সম্পর্ক দাঁড়ায়

$$c_{sw} = 4756 + 13.8t - 0.12t^2 + 3.73S$$

দেখা গেল যে, এক ডিগ্রী সেলসিয়াস উষ্ণতা বাড়লে, বেগ 10.9 ফি/সে বাড়ে ; লবণাক্ততা 0.1% বাড়লে, 3 থেকে 4 ফিট/সে বাড়ে। 6°C উষ্ণতায় 3.5‰ লবণাক্ততায় সমুদ্রজলে তাঁরা শব্দবেগ 1474 মি/সে পেলেন।

সমুদ্রজলে শব্দবেগ সম্পর্কে সব তথ্য ঘেঁটে নিম্নলিখিত সিদ্ধান্তগুলি আসে ঃ

(১) 1°C উষ্ণতা বাড়লে, বেগ 0.2% বাড়ে।

(২) নির্দিষ্ট গভীরতায় 600 ফিট (100 ফ্যাদম) ক'রে গভীরতা-বৃদ্ধিতে শব্দবেগ প্রায় 0.2% ক'রে বাড়ে।

(৩) 0.1‰ লবণাক্ততা বাড়লে, বেগ 0.1% মাত্র বাড়ে।

অল্প পরিমাণ তরলে শব্দবেগ-নির্ণয়ে গ্যাসীয় মাধ্যমের মতো নল ব্যবহার করা হয়। গ্যাসের ক্ষেত্রে নলের ব্যবহারে যে যে আপত্তি আছে এখানে সেগুলির গুরুত্ব আরও বেশী, কারণ চাপ অনেক বেশী এবং চাপসুস্পন্দ-বিন্দুতে নলের দেওয়ালের নমনীয়তা, বেগের মান কমায়। ল্যাম্ব-এর গণনানুযায়ী তরলে শব্দের প্রকৃত বেগ (c_0) আর নলের তরলে শব্দের বেগের (c) মধ্যে সম্পর্ক হওয়ার কথা

$$\left(\frac{c_0}{c}\right)^2 = 1 + \frac{Kd}{qt}$$

এখানে K তরলের আয়তনাংক, q নলের উপাদানের ইয়ং-গুণাংক, t তার বেধ, d নলের ব্যাস, আর নলের বেধ খুব মোটা হলে, ঐ অনুপাত $(1+K/s)$ দাঁড়ায় ; s এখানে উপাদানের দৃঢ়তা-গুণাংক।

ভিয়োল এবং ভটিয়ের-এর U-নল পদ্ধতি কাজে লাগিয়ে সিস্‌ম্যান তরলে সরাসরি শব্দবেগ বার করেছেন। U-নলে পুরোপুরি তরল ভ'রে তার এক মুখ লোহার চাক্তি দিয়ে বন্ধ রাখা হয় ; তাকে বিদ্যুৎ-চুম্বক দিয়ে আকর্ষণ করলে তরলে এক ক্ষণ-তনুভবন সৃষ্টি হয়। নলের অপর মুখে তরঙ্গের

পৌঁছানোর মুহূর্তটি আলোকচিত্র নিয়ে লিপিবদ্ধ করা হয়। আবার অপরপ্রান্তে অনুরূপ তরঙ্গ-সৃষ্টি ক'রে এবং প্রথম প্রান্তে গ্রহণ ক'রে ব্যতিহার-মুদ্রণ-পদ্ধায় যান্ত্রিক ত্রুটি অপনীত করা হয়। তারপর লব্ধ ফলে 'নল-সংশোধন' প্রয়োগ ক'রে বিস্তৃত তরলে শব্দবেগ $\pm 2\%$-এর মধ্যে পাওয়া গেছে; ১২টি ভিন্ন ব্যাসের নলে আট রকমের তরল ও দ্রবণে শব্দের বেগ এই পদ্ধতিতে বার করা হয়েছে।

২১-৭. কঠিন পদার্থে শব্দের বেগ-নির্ণয়:

কঠিনে শব্দবেগ প্রথম নির্ণয় করেন (১৮০৮) বায়ো; 950 মি দীর্ঘ লোহার নলের এক প্রান্তে ঘণ্টা বাজালে, অপর প্রান্তে নলের বায়ুমধ্যে এবং নলের উপাদানের মধ্যে দিয়ে আসা দুটি ধ্বনি শোনা গেল। বায়ুতে শব্দের বেগ জেনে এই সময়ের অন্তর থেকে কঠিনে বেগ বার করা হয়েছিল। কুণ্ড্-নলের সাহায্যে পিস্টন-রডের উপাদানে শব্দবেগ বার করা সহজ। নলের বায়ুতে অনুনাদ প্রতিষ্ঠা হলে, l দুই সুস্পন্দবিন্দুর অন্তর, L রডের দৈর্ঘ্য, c এবং c' বায়ুতে ও রডের উপাদানে শব্দের বেগ হলে, $c/c' = l/L$ হবে। পিয়ার্স তাঁর চৌম্বক-তন্তি-চালিত রড্ নিয়ে পরীক্ষণকালে আবিষ্কার করেন যে, রডের দৈর্ঘ্য × তার অনুদৈর্ঘ্য স্পন্দনের স্বভাবী মূল কম্পাংক = ধ্রুবক। এই ধ্রুবককে দ্বিগুণ করলেই রডে শব্দের বেগ পাওয়া যায়। মনে রাখা দরকার যে, $c = \sqrt{q/\rho}$ অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গের বেগ, অথচ স্পন্দনশীল রডে (১) উষ্ণতাভেদ ঘটলে, q-এর মান বদ্‌লায়; তা ছাড়া (২) অভ্যন্তরীণ ঘর্ষণের এবং (৩) রডের ব্যাস বরাবর কম্পনের জন্যও সংশোধন দরকার। পিয়ের, কুইম্বি এবং র‍্যালে যথাক্রমে এই সংশোধনগুলি গণনা করেছেন। ক্ল্যাড্‌নি-চিত্ররূপ পদ্ধতিতে উড ও স্মিথ প্লেটে শব্দের বেগ স্থির করেছেন। ল্যাম্ব-এর গণনানুসারে

$$c/c_t = \sqrt{3}\lambda/\pi t$$

এখানে c অনুদৈর্ঘ্য ও c_t আনমন তরঙ্গবেগ, t পাতের বেধ এবং λ তরঙ্গদৈর্ঘ্য। রডে, প্লেটে এবং অসীম বিস্তৃতির কঠিনে, অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গবেগের অনুপাত যথাক্রমে

$$1 : (1-\sigma^2)^{-\frac{1}{2}} : (1-\sigma)^{\frac{1}{2}}[(1+\sigma)(1-2\sigma)]^{-\frac{1}{2}}$$

σ এখানে উপাদানের পোয়াস-এর অনুপাত। ক্লাইন এবং হার্চবার্গার স্বনোত্তর ব্যতিচারমান-যন্ত্র ব্যবহার ক'রে কঠিনে শব্দবেগ বার করেছেন। প্রথমে তেলের মধ্যে এবং পরে তাতে আয়তাকারে কঠিন পদার্থ ডুবিয়ে দু'বারেই

স্থাণু সুস্পন্দ ও নিস্পন্দ তলগুলির অবস্থান সূক্ষ্মভাবে বার করা হয়। এখানে শব্দ-প্রতিসরাংক

$$\mu = \frac{\text{কঠিনে শব্দের বেগ}}{\text{তরলে শব্দের বেগ}} = \frac{d}{d - \Delta x}$$

d এখানে কঠিনের সুষম বেধ এবং Δx স্পন্দিত তলগুলির স্থান-সরণ। শ্যেফার এবং বার্গম্যান অতি সুন্দর এক পদ্ধতিতে ঘন আকারের স্বচ্ছ কঠিনের মধ্যে দিয়ে তার তিন কিনারার সমান্তরালে সম-কম্পাংকের তিন প্রস্ত (set) স্বনোত্তর তরঙ্গ পাঠান; এর ফলে ঘনকটি ত্রিমাত্রিক ঝর্ঝরে পরিণত হয় এবং তার মধ্যে দিয়ে আলো পাঠালে, খর দুই বিবর্তন-বৃত্তের উৎপত্তি হয়। লুডল্‌ফ-এর তত্ত্বানুসারে ভিতরের বৃত্তটি অনুদৈর্ঘ্য তরঙ্গসৃষ্ট ঝর্ঝরের দরুন এবং বাইরেরটি তির্যক্ বা কৃন্তন তরঙ্গসৃষ্ট ঝর্ঝরের জন্য হয়। দুই বৃত্ত-ব্যাসার্ধ যথাক্রমে r_l এবং r_t, পর্দা থেকে ঘনকের দূরত্ব d, আলো, অনুদৈর্ঘ্য ও অনুপ্রস্থ শব্দতরঙ্গের তরঙ্গদৈর্ঘ্য যথাক্রমে λ, λ_l' ও λ_t' হলে,

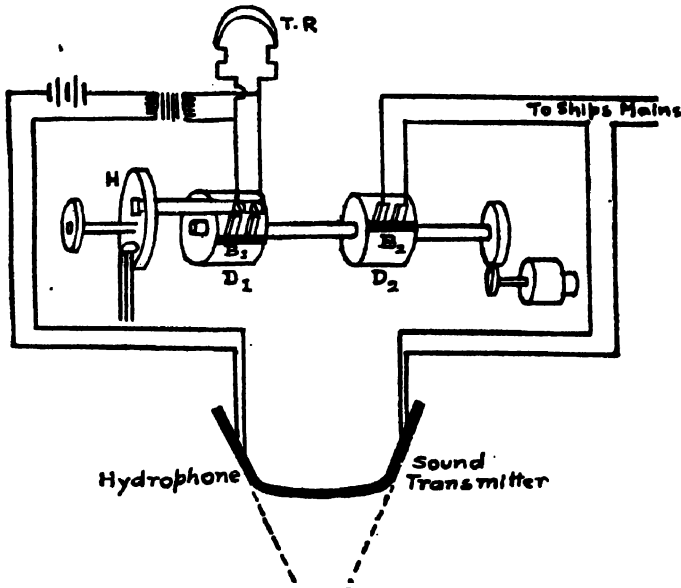
$$r_l = d \cdot \frac{\lambda}{\lambda_l'} \quad \text{এবং} \quad r_t = d \cdot \frac{\lambda}{\lambda_t'}$$

আর $$c_l = n\lambda_l' = n\frac{\lambda d}{r_l}; \quad c_t = n\lambda_t' = n\frac{\lambda d}{r_t}$$

এ-ছাড়া এই দুই গতিবেগে যথাক্রমে ইয়ং-গুণাংক (q), পৌয়াস-এর অনুপাত (σ) এবং দার্ঢ্য-গুণাংক (n) জড়িত থাকায়, সব স্থিতিস্থাপক গুণাংকগুলি একই পরীক্ষণ থেকে পাওয়া যেতে পারে। বিষমসত্ত্ব কঠিনেও এই পদ্ধতি প্রযোজ্য।

২১-৮. সমুদ্রের গভীরতা-নির্ণয়:

ক. ব্রিটিশ অ্যাডমিরাল্‌টি পদ্ধতি: জলের তলায় বিদ্যুৎ-চুম্বক-চালিত হাতুড়ি দিয়ে ধাতুছদকে পিটিয়ে নির্দিষ্ট কালান্তরে শব্দ করা হয়। আঘাত-মুহূর্ত ছাড়া অন্য সময়ে এই বিদ্যুৎ-চুম্বক হাতুড়িটিকে আটকে রাখে। D_2 (চিত্র 21.9) একটি ঘূর্ণমান ধাতুর ড্রাম এবং তার ওপরে B_2 একটি অন্তরক পটি। বিদ্যুৎ-চুম্বকটি দুটি ব্রাশের সঙ্গে যুক্ত এবং তারা ড্রামটিকে ছুঁয়ে থাকে। ড্রামটি ঘুরতে ঘুরতে, যখন B_2 ব্রাশের তলায় আসে তখন বিদ্যুৎ-চুম্বকটির বর্তনী মুহূর্তের জন্য ছিন্ন হয় এবং হাতুড়িটি বিদ্যুৎ-চুম্বকের আকর্ষণ থেকে ক্ষণেকের জন্যে ছাড়া পায়। তখন তার আঘাতে 1250 Hz কম্পাংকের অবদমিত তরঙ্গমালা ধাতুছদ থেকে বেরোয় এবং সমুদ্রতলে প্রতিফলিত হয়ে

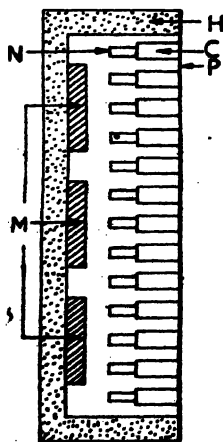
ফিরে আসে। জাহাজের অপর ধারের হাইড্রোফোনে সেই প্রত্যাগত তরঙ্গ সাড়া তোলে। হাইড্রোফোনটি একটি ট্র্যান্সফর্মারের মাধ্যমে টেলিফোন-গ্রাহকের (TR) সঙ্গে যুক্ত। এই বর্তনীটির, দ্বিতীয় ঘূর্ণমান ধাতু-ড্রাম D_1-র সঙ্গে একজোড়া ব্রাশের সংস্পর্শের দরুন বর্ত্ম ক্ষেপ (short circuit) থাকে। প্রতি ঘূর্ণনে একবার অন্তরক-পটি (B_1) ব্রাশের তলায় আসে এবং তখন

চিত্র 21.9—সমুদ্র-গভীরতা-নির্ণয়ের ব্রিটিশ অ্যাডমিরাল্টি পদ্ধতি

হাইড্রোফোন সক্রিয় হয়। একই অক্ষদণ্ডে দুটি ড্রামই ঘোরে। টেলিফোনের ব্রাশ-জোড়া একটি হাত-চাকার (H) সাহায্যে প্রেরক-সাপেক্ষে যেকোন কোণে সরানো যায়। যদি এই কোণ সঠিক হয়, তবে হাইড্রোফোনে শব্দ পৌঁছলে তা টেলিফোনে শোনা যাবে ; নচেৎ নীরবতা অক্ষুণ্ণ থাকবে। শব্দ করা এবং শোনার মধ্যে কালান্তর (১) এই কোণ এবং (২) অক্ষদণ্ডের ঘূর্ণন-বেগ থেকে সহজেই পাওয়া যায়। বাস্তবে ব্রাশ-চালক হাত-চাকাটি সরাসরি ফিট বা ফ্যাদমে অংশাংকিত থাকে।

দূরত্ব ছাড়াও সমুদ্রতলের প্রকৃতিও এই যন্ত্র থেকে অনুমান করা যায়। এজন্যে অবিচ্ছিন্নভাবে লেখ (record) গ্রহণ করা হয়। লেখ খর এবং স্পষ্ট হলে, তল কঠিন প্রস্তরময় এবং অস্পষ্ট হলে, তল নরম এবং কর্দমময় বুঝতে হবে।

খ. স্বনোত্তর তরঙ্গের ব্যবহার : ওপরে বর্ণিত স্বনতরঙ্গ-পদ্ধতিতে তরঙ্গদৈর্ঘ্য বেশী ব'লে তরঙ্গের বিবর্তনীয় আচরণ প্রকট—তারা অনেকখানি ছড়িয়ে পড়ে এবং সমুদ্রতলের অনেক বেশী জায়গা জুড়ে প্রতিফলিত হয়। তাতে সমুদ্রতলের সূক্ষ্ম ও বিস্তারিত বিবরণ পাওয়া যায় না। স্বল্পতর দৈর্ঘ্যের স্বনোত্তর তরঙ্গে রশ্মিধর্ম প্রকট, সুতরাং তার প্রতিফলন-এলাকা ইচ্ছামতো সংক্ষিপ্ত করা সম্ভব। তাই এদের সাহায্যে খুব সীমিত বস্তু, যেমন—সমুদ্রে নিমজ্জিত জাহাজের অবস্থান এবং অবস্থা পর্যন্ত নিখুঁতভাবে নির্দেশ করা সম্ভব।

স্বনোত্তর সমুদ্র-গভীরতা-মাপক যন্ত্রে স্বনক ও গ্রাহক হিসাবে নিকেলের চৌম্বক-তীত দণ্ড ব্যবহার করা হয়। তার কম্পাংকপাল্লা সাধারণত 10 থেকে 40 কিলোচক্র পাল্লার মধ্যে রাখা হয়, কেননা সমুদ্রজলে এর বেশী কম্পাংকের তরঙ্গ বেশী শোষিত হয়। প্রেরকের বিকিরিত শাব্দশক্তিমাত্রা 150 ওয়াটের মতো হয় এবং সমতলীয় তরঙ্গ উৎপাদনের উদ্দেশ্যে বিকিরক-তল বেশ বড় করা হয়।

21.10 চিত্রে স্বনোত্তর তরঙ্গ-প্রেরকের একটি নক্সা দেখানো হয়েছে। P পাতটি স্বনোত্তর কম্পাংকে স্পন্দমান তল—তার সঙ্গে সমকোণে যথাযোগ্য দৈর্ঘ্যের অনেকগুলি নিকেল রড্ (N) লাগানো। রড্গুলি স্বনোত্তর কম্পাংকের প্রত্যাবর্তী বিদ্যুৎ-ধারাবাহী পরিবাহী-কুণ্ডলীমালার (C) এক সমন্বয় দিয়ে বেষ্টিত; রড্গুলির দৈর্ঘ্য উৎপন্ন তরঙ্গদৈর্ঘ্যের সিকিভাগ করা হয়। একটি যন্ত্রে এইরকম শত শত নল থাকে; তাদের এক প্রান্ত মুক্ত, অপর প্রান্ত ইস্পাতের P পাতে সেঁধিয়ে থাকে। পাতের মাপ এমন করা হয়, যাতে সমস্ত সমাবেশটির স্বভাবী কম্পাংক নল-কম্পাংকের কাছাকাছি হয়। কুণ্ডলীগুলিতে চুম্বকন-প্রবাহ সমদশায় থাকে। সমগ্র সমাবেশ একটি জলানিরুদ্ধ আধারের (H) মধ্যে বসানো থাকে। তার মধ্যেই স্থায়ী চুম্বক M নিকেল দণ্ডগুলিকে চুম্বকিত ক'রে রাখে।

চিত্র 21.10—স্বনোত্তর তরঙ্গ-প্রেরক ও -গ্রাহক

প্রত্যাবর্তী চুম্বকক্ষেত্রের ক্রিয়ায় নিকেল রড্গুলিতে দৈর্ঘ্যের যে হ্রাস-বৃদ্ধি হয়, তার ফলে P পাতটি স্পন্দিত হয়ে

সংলগ্ন জলে স্বনোত্তর তরঙ্গ জাগায়। এই তরঙ্গ অবদমিত ক্ষণ-তরঙ্গ; একটি বিদ্যুৎ-ধারক থেকে ক্ষণস্থায়ী (মিলিসেকেণ্ডের মতো) ক্ষরণজাত প্রবলমাত্রা (>100 অ্যাম্পিয়ার) প্রবাহ পাঠিয়ে, পাতে ক্ষণ-স্পন্দন জাগানো হয়। একটি মোটরের ওপর ঘূর্ণমান সংযোগ-ব্যবস্থার সাহায্যে এই স্পন্দনাংক নিয়ন্ত্রিত হয়। এই ব্যবস্থায় ধারক পর্যায়ক্রমে আহিত ও ক্ষরিত হতে থাকে।

এক উচ্চ-বৃদ্ধি (high gain) ভাল্‌ভ্‌-বিবর্ধক-যুক্ত দ্বিতীয় এক অনুরূপ চৌম্বক-তাঁত-সমাবেশে প্রতিফলিত শব্দ গৃহীত হয়। দ্রুত চলমান একফালি কাগজের ওপর একটি লেখনী, প্রতিফলিত ক্ষণ-শব্দসংকেত চিহ্নিত করে ; তার ওপরে প্রেরণ-মুহূর্তও চিহ্নিত থাকে। 21.2 চিত্রের মতো দুই দাগের মধ্যে দূরত্ব—সংকেত-প্রেরণ ও গ্রহণ-মুহূর্তের অন্তর অর্থাৎ গভীরতার সমানুপাতিক হবে। লিপিগ্রাহক ব্যবস্থাটি সরাসরি গভীরতায় অংশাংকিত থাকে।

২১-৯. সোনার—SONAR (SOund Navigation And Ranging):

জলের তলায় ক্ষণসংকেত পাঠিয়ে ডুবো-জাহাজের অস্তিত্ব-সন্ধান এই প্রকরণের উদ্দেশ্য। এখানেও পাল্লা-নির্ণয় গভীরতা-মাপার পদ্ধতিতেই করা হয়। সোনার-এর আর এক কাজ, পর্যবেক্ষকের অবস্থান-সাপেক্ষে চলমান লক্ষ্যবস্তুর কৌণিক অবস্থান, গতিবেগ ও গতিমুখ নির্ণয় করা। এই উদ্দেশ্যে rho-c রবারের তৈরী এক গম্বুজের মধ্যে প্রেরক ও গ্রাহক দুই যন্ত্রই রাখা হয় এবং গম্বুজটিকে ইচ্ছামতো দিকে ঘোরানো যায়। rho-c রবারের বিশিষ্ট বাধ জলের সমান হওয়ায়, জলের সাপেক্ষে উপাদানটি শব্দস্বচ্ছ। প্রেরক ও গ্রাহক যন্ত্র ওপরে বর্ণিত হয়েছে। অন্য জাহাজ বা ডুবো-জাহাজ ধাতুনির্মিত হওয়ায়, তার বিশিষ্ট বাধ জল থেকে অনেক আলাদা ; তাই নির্দিষ্টমুখী স্বনোত্তর শব্দকিরণের অনেকটাই প্রতিফলিত হয়ে আসে। লক্ষবস্তুর দূরত্ব স্থির হয়ে গেলে এবং প্রতিধ্বনি-গ্রহণের মুহূর্তে প্রেরকের কৌণিক অবস্থান জানা থাকলে, লক্ষ্যবস্তুর বেগের মান ও দিক্ দুইই পাওয়া যায়। এই পদ্ধতিতে কিন্তু, হিমশৈলের অবস্থান-নির্ণয়ের চেষ্টা ব্যর্থ হয়েছে, কেননা জল ও বরফের বিশিষ্ট বাধ সমান হওয়ায় শব্দের প্রতিফলন হয় না।

২১-১০. জাহাজের অবস্থান-নির্ণয়:

জাহাজের ক্যাপ্টেনের প্রায়ই, বিশেষত কুয়াশায়, জাহাজের অবস্থান জানা খুবই জরুরী দরকার। সাধারণত (ক) সমকালীন সংকেত-প্রেরণ, (খ) শাব্দ-বেতার, এবং (গ) প্রতিধ্বনি—এই তিন পদ্ধতিতে সমুদ্রে জাহাজের অবস্থান

নির্ণয় করা যায়। সমুদ্রে শব্দবেগের এবং লবণাক্ততা ও উষ্ণতাভেদে বেগ-পরিবর্তন নিখুঁতভাবে জানা থাকায় এই কাজ সুষ্ঠভাবে হয়।

(ক) সমকালীন সংকেত-প্রেরণ-পন্থা সাধারণত পণ্যবাহী জাহাজে ব্যবহার হয়। নির্দিষ্ট স্টেশন থেকে বিভিন্ন বেগে একসঙ্গে বায়ুপথে ও জলপথে এবং বেতারে সংকেত পাঠানো হয় এবং জাহাজে তাদের গ্রহণ করা হয়। অধিকাংশ ক্ষেত্রে জল-বাহিত সংকেত এবং বেতার-সংকেত পাওয়ার সময়-ব্যবধান থেকে প্রেরক স্টেশন ও জাহাজের মধ্যের দূরত্ব পাওয়া যায়। বেতার-সংকেত-গ্রহণ-মুহূর্তকে স্টেশন থেকে জলবাহিত শব্দের প্রেরণ-মুহূর্ত ব'লে ধরা যায়।

(খ) ব্রিটিশ অ্যাড্‌মিরালটি উদ্ভাবিত শাব্দ-বেতার পদ্ধতি এই ব্যাপারে খুব উপযোগী। জাহাজের একজন বেতারকর্মী জোড়া চাবি টিপে একই সঙ্গে বেতার-সংকেত এবং জলের তলায় বিস্ফোরণ ঘটান। এই দুই সংকেত তীরবর্তী দুটি স্টেশনে গৃহীত হয়। তাদের মধ্যে দূরত্ব নিখুঁতভাবে জরিপ থেকে বার করা থাকে। জলে শব্দের বেগ c_W, বেতার-তরঙ্গের বেগ c, জাহাজ এবং স্টেশনের মধ্যে দূরত্ব l এবং যেকোন স্টেশনে দুই সংকেত-গ্রহণের মধ্যে কালান্তর t হলে

$$t = l/c_W - l/c = l/c_W \qquad [\because \quad c \gg c_W]$$

l' দূরত্বে অবস্থিত দ্বিতীয় স্টেশনে $t' = l'/c_W$; এখন দুই স্টেশনকে কেন্দ্র ক'রে $l\ (=tc_W)$ এবং $l'\ (=c_W t')$ ব্যাসার্ধের দুই বৃত্ত টানলে, তাদের ছেদবিন্দুটিই জাহাজের অবস্থান। প্রতিটি স্টেশন থেকে জাহাজের দূরত্ব নির্ণয় ক'রে সেই খবর বেতারে জাহাজে জানিয়ে দেওয়া হয়।

সমুদ্রে জানা দূরত্বে দুটি জাহাজ থাকলে, এই পদ্ধতিতেই সমুদ্রের জলে শব্দের বেগ নির্ণয় করা যায়। উড এবং ব্রাউন যে পদ্ধতিতে জলে শব্দবেগ বার করেছেন, ঠিক সেইভাবেই তাঁরা জাহাজের অবস্থানও বার করেছেন।

২১-১১. শব্দের পাল্লা-নির্ণয় (Sound Ranging):

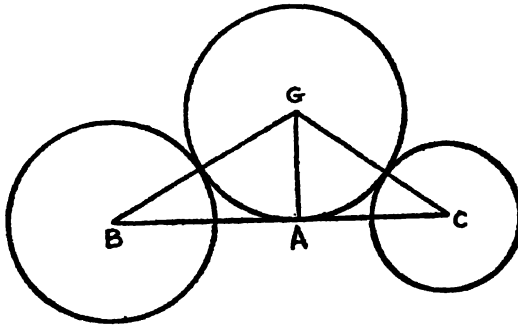
প্রথম মহাযুদ্ধকালে শত্রুর কামানের অবস্থান নির্ণয় করার চেষ্টা থেকে এই প্রকরণ উৎপন্ন হয়। এই অনুসন্ধান-কালেই টাকার তপ্ত-তার মাইক্রোফোনের উদ্ভাবন করেন। দ্বিতীয় মহাযুদ্ধেও, বিশেষ ক'রে পাহাড়ী জায়গায় এই পদ্ধতি ব্যবহার করা হয়েছিল।

তিনটি ভিন্ন ভিন্ন স্টেশনে প্রাপ্ত শব্দের সময় থেকে বিস্ফোরণের উৎস-সন্ধানই এই করণের উদ্দেশ্য। কামান ছুঁড়লে শক্‌-তরঙ্গ, গোলার বিস্ফোরণ

এবং কামান-গর্জন—এই তিন রকমের শব্দতরঙ্গের উৎপত্তি হয়। শেষ শ্রেণীর তরঙ্গই আমাদের অনুসন্ধানের বিষয়বস্তু; তার প্রাবল্য বেশী, কম্পাংকও কম। স্বল্পকম্পাংক-অনুনাদক-যুক্ত তপ্ত-তার মাইক্রোফোনই এই কাজে সেরা শব্দসন্ধানী।

সূক্ষ্মভাবে জরিপ-করা দূরত্বে একই সরলরেখা বরাবর তিনটি মাইক্রোফোন থাকে। তাদের প্রতিটি একটি ছয়-তার এইনথোভেন গ্যালভ্যানোমিটারের সঙ্গে যুক্ত।

তন্ত্রীগুলির সরণ এক আলোক-সচেতন ফিল্‌মে লিপিবদ্ধ হয়। ফিল্‌মের ওপর সেকেণ্ডের শতাংশ চিহ্নিত থাকে।

21.11 চিত্রে, ধরা যাক, সমরেখায় A, B, C তিনটি মাইক্রোফোনের এবং G বিন্দুতে কামানের অবস্থান; G থেকে তিনটি মাইক্রোফোনে শব্দ পৌঁছতে t_1, t_2 এবং t_3 সময় লাগে, তার মধ্যে t_1 সবচেয়ে কম। G এবং পর্যবেক্ষকদের মধ্যবর্তী বায়ুমণ্ডলের উষ্ণতা, আর্দ্রতা ও বাতাসের বেগ জানা থাকলে শব্দের বেগ আন্দাজ করা সম্ভব। গ্যালভ্যানোমিটারের লিখন থেকে

চিত্র 21.11—কামানের অবস্থান-নির্ণয়

(t_2-t_1) এবং (t_3-t_1) জানা যায়। ম্যাপে B এবং C-কে কেন্দ্র ক'রে ঐ ঐ সময়ে শব্দ কর্তৃক অতিক্রান্ত দূরত্বের সমান ব্যাসার্ধ নিয়ে বৃত্ত আঁকা হয়। যে বৃত্ত তাদের দুটির প্রত্যেককেই স্পর্শ করে, G তার কেন্দ্রবিন্দু।

প্রশ্নমালা

১। খোলা হাওয়ায় শব্দবেগ-নির্ণয়ের অসুবিধাগুলি কি কি, বল। এ সম্বন্ধে কোন একটি আধুনিক নির্ভুল পরীক্ষণ বর্ণনা কর। বায়ুমণ্ডলের শাব্দ-অবস্থা নিয়ন্ত্রণাধীন হলে, শব্দবেগ-নির্ণয়ের একটি নির্ভুল পন্থা বর্ণনা কর।

২। নলে শব্দবেগ-নির্ণয়ে সুবিধা বা অসুবিধা কি কি ? এ সম্বন্ধে তাত্ত্বিক কাজের সংক্ষিপ্ত আলোচনা কর। গ্যাসে শব্দবেগ-নির্ণয়ে কুণ্ড্-নলের নীতি লেখ। এই ব্যবস্থার কি কি উন্নতি হয়েছে ? তরঙ্গদৈর্ঘ্য মাপতে দুই নিস্পন্দ- না সুস্পন্দ-বিন্দুর মধ্যে দূরত্ব মাপা হবে ? কেন ?

কুণ্ড্-নল দিয়ে কঠিনে এবং অল্প পরিমাণ গ্যাসে শব্দবেগ-মাপা কি-ভাবে সম্ভব ? তাতে কি-রকম সূক্ষ্মতা পাওয়া যাবে ?

৩। স্বল্পকম্পাংকের স্বল্পবিস্তার স্বনোত্তর তরঙ্গের প্রবাহী মাধ্যমে বেগকে কি কারণে শব্দবেগের সমান ধরা চলে ? স্বনোত্তর ব্যতিচারমান-যন্ত্র এই উদ্দেশ্যে কি-ভাবে ব্যবহার হয় ? এক্ষেত্রে ব্যবহৃত স্পন্দকের বর্ণনা দাও।

৪। সমুদ্রের গভীরতা-মাপার কোন পদ্ধতির বিশদ বর্ণনা দাও। সেই প্রসঙ্গে ব্যবহৃত জলতলে স্বনোত্তর স্পন্দকের বর্ণনা দাও। সোনার-প্রক্রিয়ায় এই স্পন্দক কি-ভাবে ব্যবহার হয় ? হিমশৈলের অবস্থান এই পদ্ধতিতে কেন বার করা যায় না ?

৫। জাহাজের, ডুবো-জাহাজের, ডুবো-পাহাড়ের এবং শত্রুপক্ষীয় বড় কামানের স্থান নির্ণয় করার পন্থাগুলি বর্ণনা কর।

৬। সমুদ্রজলে শব্দবেগ কি-ভাবে নির্ণীত হয়েছে ? এই বেগের মান কিসের কিসের ওপর নির্ভর করে ? এই নির্ণয়ের গুরুত্ব কি কি ?

৭। অল্প পরিমাণ তরলে শব্দবেগ কি-ভাবে বার করা যায় ? কঠিনে শব্দবেগ-নির্ণয়ের নির্ভুল পন্থা বর্ণনা কর ; এখানে স্বনোত্তর তরঙ্গের ব্যবহার সম্বন্ধে আভাসে বল। এই প্রসঙ্গে কঠিনের স্থিতিস্থাপক-গুণাংক-নির্ণয়ে এই-জাতীয় তরঙ্গের অবদানের ইঙ্গিত দাও।

বিষয়-সূচী

পরিভাষা

ABSORPTION—শোষণ
Acoustics—স্বনবিদ্যা
Acoustic analogue, doublet, field—শাব্দ-উপমিতি, -যুগ্মক, -ক্ষেত্র
Adiabatic—রুদ্ধতাপ
Alternating—প্রত্যাবর্তী
Amplifier—বিবর্ধক, সম্প্রসারক
Amplitude—বিস্তার
Analysis—বিশ্লেষণ
Anechoic—প্রতিধ্বনি-রহিত
Anharmonic—অসমঞ্জস
Anticlockwise—বামাবর্তী
Antinode—সুস্পন্দবিন্দু
Aœlean—বায়ব
Aperiodic—দোলহীন
Assumption—অঙ্গীকার
Asymmetric—অ-সমঞ্জস
Attenuation—অবক্ষয়, ক্ষীণীভবন
Audio—শ্রাব্য, স্বন
Auditorium—শ্রবণাগার
-acoustics—সৌধস্বনবিদ্যা
Auditory canal—কর্ণকুহর
Aural harmonic—শ্রুতি-সমমেল

BACKGROUND—পশ্চাৎপট
Baffle—নিরস্তক
Ballistic—ক্ষেপক
Band-pass—পটিপ্রেরক
Beats—স্বরকম্প
Bowed—ছড়-টানা
Bulk modulus—আয়তন-বিকারাংক, আয়তনাংক

CALIBRATED—অংশাংকিত

Capsule—কোষ
Cavitation—গহ্বরণ
Cavity—গহ্বর
Central—কেন্দ্রগ
Characteristic—বিশিষ্ট
Chord—মেল, তান
Cinematograph—চলচ্চিত্র
Clockwise—দক্ষিণাবর্তী
Column—স্তম্ভ
Cochlea—শম্বুকী-নল
Coercivity—নিগ্রাহিতা
Collinear—সমদিশ, সমমুখী
Combination tone—যুক্তস্বন
Compliance—নম্যতা
Component—অংশ, আঙ্গিক
Concord—স্বরবন্ধ
Condensation—ঘনীভবন
Cone—শংকু
Conjugate—অনুবন্ধী
Consonance—স্বরসঙ্গতি
Consonant—ব্যঞ্জনবর্ণ
Conservative—সংরক্ষী
Contour—অবয়ব-রেখা
Configuration—সজ্জা
Coherence—সংসক্তি
Coupled vibration—যুগ্মস্পন্দন
Coupling—যোজন
Critical—ক্রান্তিক
Crystal—স্ফটিক
Current—ধারা
Cutting-head—লিপিমুদ্রক

DAMPED—মন্দিত, অবদমিত
Decay-modulus—ক্ষয়-মানক

Decrement—হ্রাস, ক্ষয়
Degree of freedom—স্বাতন্ত্র্য-সংখ্যা
Depth-sounding—গভীরতা-নির্ণয়
Diaphragm—ছদ
Diatonic scale—স্বভাবী স্বরগ্রাম
Dielectric constant—মাধ্যম-বিদ্যুতাংক, দ্বি-বৈদ্যুতাংক
Difference tone—অন্তরস্বন
Differential—অবকল
Diffraction—বিবর্তন
Directivity—দিঙ্মুখিতা
Disc—চক্র
Discharge—ক্ষরণ, মোক্ষণ
Dissonance—স্বরবিক্ষোভ
Discord—স্বরবিক্ষোভ
Distributed—বণ্টিত
Driver—চালক

Eardrum—কর্ণপটহ
Echo—প্রতিধ্বনি
Echelon—সোপান
Eigenvalue—অনন্যমান, বিধিবদ্ধমান
Edge tone—ফলক-স্বর
Electrodynamic—চল-বৈদ্যুত
Elevation—পার্শ্বচিত্র
Emulsion—অবদ্রব
Endolymph—মধ্যলসিকা
End-error—প্রান্তীয় ত্রুটি
Epicenter—ভূকম্প-নাভি
Equiangular—সমকৌণিক
Equivalent—প্রতিসম
Exponential—সূচকীয়
Expression—প্রতিরূপ, ব্যঞ্জক
Eyepiece—অভিনেত্র

Fault—ভূ-ভঙ্গ
Fenestra-ovalis—ডিম্বাক্ষ
Fenestra-rotunda—বৃত্তাক্ষ
Fidelity—আনুগত্য, বিশ্বস্ততা
Filament—তন্তু, সূত্র
Flame—শিখা
: Sensitive—সুবেদী
: Singing—গীতি, সুরেলা
Flexure—নমন, আনমন
Flue—রন্ধ্র
Fluid—প্রবাহী
Forced—পরবশ, চালিত
Formant—সংস্থানক
Free—মুক্ত, স্ববশ
Function—ফলন, অপেক্ষক
Fundamental—মূল

Gauze tone—জালি-স্বর
General—সর্বমান্য, সাধারণ
Gradient—অবক্রম, নতি
Graphical—লৈখিক
Grating—ঝর্ঝর
Grating-space—ঝর্ঝর-অবকাশ
Ground wave—ভূ-তরঙ্গ
Group velocity—দলবেগ

Harmonic—সমমেল, সমঞ্জস
Harmony—মেল
Harp—বীণা
Heterogeneous—বিষমসত্ত্ব
Hill and dale—আল-খাল
Homogeneous—সমসত্ত্ব
Horn—শিঙা
Hot-wire—তপ্ত-তার
Hydrophone—বারিশব্দগ্রাহী
Hypersonic—অতিস্বনোত্তর

IMPEDANCE—বাধ
Impedance-matching—বাধ-সামঞ্জস্যক
Incus—নেহাই
Inertance—জাড্যতা
Inertia—জড়তা
Infrasonic—অবস্বন
Input—নিবেশ
Insensitive—অগ্রাহী
Intensity—তীব্রতা
Interval (musical)—(স্বর)-অন্তর
Isochronous—সমকাল, সমলয়
Isothermal—সমোষ্ণ
Isotropic—সমসত্ত্ব

JET TONE—রন্ধ্রস্বর

KEYNOTE—সূচনা-স্বর
Keyboard—কুঞ্চিকা-পেটি

LAMINA—ফলক, পাত
Laryngoscope—বাক্‌যন্ত্র-বীক্ষণ
Larynx—বাক্‌যন্ত্র
Ligaments—সন্ধিবন্ধনী
Location—অবস্থান
Longitudinal—অনুদৈর্ঘ্য
Loudness—প্রাবল্য
Lungs—ফুস্‌ফুস

MACROSCOPIC—স্থূলসত্ত্বক
Macrosonics—বিপুলশাব্দতত্ত্ব
Magnetophone—চৌম্বকভাষ
Magnetic Tape—চৌম্বক-ফিতা
Magnetostriction—চৌম্বক-ভতি
Maintenance—লালন, পালন, পোষণ
Malleus—হাতুড়ি
Matrix—ধাত্র
Melody—তান
Membrane—ঝিল্লী
Microgroove—অণুনালী
Modulation—ভেদন
Monochord—একতারা
Moving coil—চল- বা দোল-কুণ্ডলী
Musical sound—সুরেলা শব্দ

NATURAL—স্বভাবী
Node—নিস্পন্দবিন্দু
Noise—অপস্বর
Normal co-ordinate—স্বভাবী স্থানাংক
Note—স্বর

OBLIQUE—অনৃজু
Objective—নৈর্ব্যক্তিক
Octave—স্বর-অষ্টক
Operator—কারক
Oscillation—দোলন
Oscillograph—দোলন-লিখ্‌
Overdamped—অতিমন্দিত
Overtone—উপস্বর
Output—উৎপাদ

PARAMETER—প্রাচল
Partial—আংশিক, উপস্বর
Perilymph—প্রান্তীয় লসিকা
Period—পর্যায়কাল
Percussion instrument—ঘাত-যন্ত্র
Performance—কৃতি
Permeability—চুম্বকশীলতা
Persistence—নির্বন্ধ
Personal equation—ব্যক্তিভ্রম
Phase—দশা

Phase-velocity—দশা-বেগ
Phonedeik—স্বনদর্শ
Phonograph—স্বনলিখ্
Piezo-electric—চাপবৈদ্যুত
Pinna—কর্ণপত্রক
Pitch—তীক্ষ্ণতা
Plan—শীর্ষচিত্র
Plane—সমতলীয়
Plate—পাত
Plucked—টংকারিত
Polar—ধ্রুবীয়
Polarisation—সম-বর্তন, মেরুধর্মের আরোপ
Processing—পরিস্ফুটন
Profile—পার্শ্বচিত্র
Progressive—সচল, চল-
Projectile—প্রাস
Projection—অভিক্ষেপ
Propagation—ব্যাপ্তি, প্রসার
Public address—জন-সম্ভাষণ
Pulsatance—স্পন্দনাংক
Pulse—শব্দ-ঘাত
Push-pull—আকর্ষ-বিকর্ষ

QUADRATURE—পাদবিলম্বী
Quality—স্বনজাতি
Quasi-elastic—স্থিতিস্থাপকপ্রায়

RADIATION—বিকিরণ
Radio—বেতার
Random—অক্রম
Range—পাল্লা
Reactance—প্রতিক্রিয়তা
Receiver—গ্রাহক
Reception—সন্ধান, গ্রহণ
Reciprocal—ব্যতিহারী
Recorder—মুদ্রক
Record—অনুলিপি
Rectifier—শোধক
Reed—পত্রী
Reference—নির্দেশ
Relaxation—শ্লথন
Reproduction—পুনর্নাদ
Resonance—অনুনাদ
Response—সাড়া, প্রতিবেদন
Restoring force—প্রত্যানয়ক বল
Reverberation—অনুরণন
Reversible—অপনেয়, বিষম
Rigidity—দার্ঢ্য

SCALAR—অদিশ্
Scala vestibuli—ঊর্ধ্বকক্ষ
Scala tympany—নিম্নকক্ষ
Scattering—বিক্ষেপণ
Seismic—ভূকম্প-তত্ত্বীয়
Semitone—অর্ধস্বরান্তর
Sensitivity—সুবেদিতা
Series—রাশিক্রম
Shear—কৃন্তন
Shock—অভিঘাত
Signal—সংকেত
Sonic—শাব্দ, স্বন-
Sonometer—স্বন-মাপী
Sound-box—শব্দপেটি
Space—দেশ
Spatial—কৌণিক-দেশীয়
Standard—প্রামাণ্য
Stapes—রেকাবি
Stationary—স্থাণু
Stiffness—দার্ঢ্য
Strain—তভি, বিকৃতি
Stratosphere—স্তব্ধস্তর

Stria—বিলেখমালা
Stroboscope—ভ্রমিদৃক্
Subjective—ব্যক্তিসাপেক্ষ
Summation—যৌগ
Superposition—সমাপতন
Supersonic—শব্দোত্তর, অধিশব্দ
Sympathetic—সমবেদী
Synchronous—সমলয়
Synthesis—সংশ্লেষ

TAPE—ফিতা
Telephone—দূরভাষ
Terminal—প্রান্তিক
Tempered—সমীকৃত
Threshold—সীমান্ত
Tone-arm—স্বন-বাহু
Torsional—ব্যাবর্ত
Trachea—কণ্ঠনালী
Transducer—রূপান্তরক
Transfer—হস্তান্তর
Transient—অচির
Transmission—উত্তরণ
Transverse—অনুপ্রস্থ
Troposphere—ক্ষুব্ধস্তর

Tuned—মেলবদ্ধ
Tuning fork—সুরশলাকা
Turn-table—ঘূর্ণন-মঞ্চ
Twin waves—যমজ তরঙ্গ

ULTRASONIC—স্বনোত্তর
Ultra-sonograph—স্বনোত্তর চিত্রলেখ
Unison—সমতান, সমস্বন

VARIABLE—চলক
Vector—সদিশ্
Vocal cord—স্বরতন্ত্রী
Vowels—স্বরবর্ণ
Vibration—স্পন্দন
Viscosity—সান্দ্রতা

WAVE—তরঙ্গ
Wave-front—তরঙ্গ-মুখ
Wave-form—তরঙ্গ-ছাঁদ
Wave-velocity—তরঙ্গ-বেগ
Wind instrument—বাতযন্ত্র

ZONE—মণ্ডল

শুদ্ধিপত্র

পৃষ্ঠা	লাইন	আছে	হবে
৯ } ৪৮	১৪ } ১২	১-৪.৩(গ)	১-৪.৩(ঘ)
১১	১০	$Q_3, Q\ Q_4$	Q_3, O, Q_4
৪০	১৪	পরীক্ষানলে জলের	পরীক্ষানলের, জলে
৪৬	১	$(e^{\theta}+e^{-j\theta})$	$(e^{j\theta}+e^{-j\theta})$
৫০	২২	$\lvert r\, d\theta/dt \rvert$	$\lvert r^2\, d\theta/dt \rvert$
৫৩	চিত্র 2.2	সরল দোলনের	মন্দিত দোলনের
৫৬	১০	$=\frac{\dot{x}_0 e^{-kt}}{\sqrt{\omega_0^2-k^2}.t}$	$=\frac{\dot{x}_0 e^{-kt}}{\sqrt{\omega_0^2-k^2}}$
৬১	৯	$=-\frac{1}{2k}.$	$=-2k.$
৬৩	৮	$=e=$	$=e^{\delta}=$
৭০	৯	$[A e^{\sqrt{-k^2-\omega^0}}\, t+$	$[A e^{\sqrt{k^2-\omega_0^2}.t}+$
৯০	১৪	$=\cot\phi=\tan\left(\frac{\pi}{2}-\phi\right)$	$=-\cot\phi=\tan\left(\frac{\pi}{2}+\phi\right.$
৯৭	১২	$x=F/(\omega Z_m)$	$x=(F/\omega Z_m)$
৯৭	২০	$+(\omega^1-\omega_0^2)]$	$+(\omega^2-\omega_0^2)^2]$
৯৭	২৩	$+(\omega^2-\omega_0^2)]^{\frac{1}{2}}$	$+(\omega^2-\omega_0^2)^2]^{\frac{1}{2}}$
১০১	ফুটনোট ১	$12m\omega^2=4ms-2r^2$	$6m^2\omega^2=2sm-r^2$
১০৩	৯	$=\frac{2k}{(\omega_0^2/\omega)-\omega}$	$=\tan^{-1}\frac{2k}{(\omega_0^2/\omega)-\omega}$
১০৫	১০	$=F\tau/\omega_0$	$=f\tau/\omega_0$
১১০	১০	(12.6 চিত্রে)	(12.5*a* চিত্রে)
১২৫	১১	x	x_1
১২৫	২৭	$x_0 \sin \omega_0 kt$	$x_0 \sin \omega_0 t$
১২৬	৭	$+\omega_- A_2 \sin \beta_2$	$-\omega_- A_2 \sin \beta'$
১২৮	৯	$(s_1+s_2)/m \doteq \omega_1^2$	$(s_1+s_2)/m_1=\omega_1^2$
১২৮	শেষ দুই	$\omega_+=$ $\omega_-=$	$(\omega_+)^2=$ $(\omega_-)^2=$
১২৯	২৪	$=\frac{\omega_+^2-\omega^2}{s}$	$=\frac{\omega_+^2-\omega_2^2}{s}$
১৩০	১০	$m \neq m_2$	$m_1 \neq m_2$
১৩০	শেষ দুই	$=2x_1\sqrt{m}$ $=2x_2\sqrt{m}$	$=2x_1\sqrt{m_1}$ $=2x_2\sqrt{m_1}$
১৩১	৯	$=x_0\sqrt{m/m_2}$	$=x_0\sqrt{m_1/m_2}$
১৩২	৫	$+\omega_1^2 x+\omega_2^2 y-$	$+\omega_1^2 x^2+\omega_2^2 y^2-$
১৩৩	শেষের আগের	$\omega_0 s/2$	$\omega_0/2$

উচ্চতর স্বন-বিদ্যা ঃ শুদ্ধিপত্র

পৃষ্ঠা	লাইন	আছে	হবে
১৭৬	১৮	$=p_m \xi_m \sin 2\beta x$	$=p_m \xi_m \omega \sin 2\beta x$
১৯২	১১	$(c\rho_0 v_m^2)$	$(c\rho_0 v_m)^2$
১৯৫	১৫	আর্গ/সেমি²	$\frac{\text{আর্গ/সে}}{\text{সেমি}^2}$
২০৭ ২০৭	১৬ ১৯	$\partial^2 \xi/\partial^2 x$	$\partial^2 \xi/\partial x^2$
২৫৯	১১	অনুনাদী কম্পাংক n_0	অনুনাদী কম্পাংক n_R
২৬০	১৯	$s < m$	$s > m$
২৬০ ২৬১ ২৬১	২৬ ১ ২	শাব্দ ভর m_a	শাব্দ ভর M_a
২৭৮	১৯	$+HH'^2$	$+KH'^2$
২৭৮	চিত্র 9.7	HGH	HGH'
৩১৪	১৪	$y=b\cos(\omega t-\alpha)$	$y=b\sin(\omega t-\alpha)$
৩৪৩ ৩৪৩	১ ১৬	10.21 (a)	10.20 (a)
৩৭৩	ফুটনোট ২	মেনে চলে	মেনে চলে না
৪০১ ৪০১	৫ ৮	$\frac{\partial Y}{\partial x}$	$\frac{\partial y}{\partial x}$
৪০২	১২-৮.৭	$(Y_m^2+Y_m^2\omega_m)$	$(\dot{Y}_m^2+Y_m^2\omega_m^2)$
৪০৭	১৯	রাশিটিকে k ধরলে	রাশিটিকে kx ধরলে
৪০৭	২০	$\cos x$	$\cos kx$
৪১২	৫	এবারে l_m এর মান	এবারে b_m এর মান
৪১২	১২-১২.৫	$2U/mxc$	$2U/m\pi c$
৪৩৫	১৩-৩.৪	$\cos m\pi x/c$	$\cos m\pi x/l$
৪৪৪	৭	এবং নিস্পন্দবিন্দুও	এবং চাপ-নিস্পন্দবিন্দুও
৪৪৬	১৩-৬.৯	$\sqrt{\omega c_1 k}$	$\sqrt{\omega c_1 \kappa}$
৪৬৩	শেষ	$=-2\alpha\beta$	$=2\alpha\beta$
৫৪১	১৫-১১.৩	$=Eka/p_m$	Eka/p_{mB}
৬৪৮	৪, ৬	রবার	রবাব
৬৮৭	শেষ	অবকলন	সমাকলন
৭০২	১৩	প্রায় 9.19 স্যাবিন	প্রায় 0.19 স্যাবিন
৭৪৩	৩	FT দূরত্বের	PT দূরত্বের